# Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V.

# Band 16

# 2007

DGPF



W Fachhochschule Nordwestschweiz

Vorträge Dreiländertagung 27. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF

> 19. – 21. Juni 2007 in Muttenz, Basel

Von der Medizintechnik bis zur Planetenforschung – Photogrammetrie und Fernerkundung für das 21. Jahrhundert

ISSN 0942-2870

Eckhardt Seyfert, Hrsg.

Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V.

Band 16

2007

# Vorträge Dreiländertagung SGPBF, DGPF und OVG

27. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF

19. – 21. Juni 2007 in Muttenz, Basel

Von der Medizintechnik bis zur Planetenforschung – Photogrammetrie und Fernerkundung für das 21. Jahrhundert

Eckhardt Seyfert, Hrsg.

ISSN 0942-2870



ISSN 0942-2870

Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V. Band 16, 719 S., Potsdam 2007 Hrsg.: Eckhardt Seyfert

© Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V. Oldenburg 2007

Zu beziehen durch:

Geschäftsstelle der DGPF c/o EFTAS GmbH Oststraße 2-18 D-48145 Münster Tel.: (0251) 133 070, Fax: (0251) 133 0733, E-Mail: <u>klaus.komp@eftas.com</u>

Druck :

Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg Heinrich-Mann-Allee 103, 14473 Potsdam Tel.: (0331) 8844 -229, Fax: (0331) 8844-126

# VORWORT

In diesem Jahr ist es wieder soweit: die drei nationalen Gesellschaften für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation der Schweiz, Deutschland und Österreich treffen sich vom 19. bis 21. Juni 2007 an der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) in Muttenz/Basel zu einer gemeinsamen Dreiländertagung. Das wissenschaftlich-technische Programm der Dreiländertagung 2007 soll den aktuellen Stand der Forschung und Technik im deutschsprachigen Raum sowie wichtige zukünftige Trends aufzeigen und gleichzeitig Gelegenheit zum aktuellen Erfahrungs- und Gedankenaustausch bieten.

Mit dem diesjährigen Tagungsmotto:

# Von der Medizintechnik bis zur Planetenforschung – Photogrammetrie und Fernerkundung für das 21. Jahrhundert

Soll das enorm breite Einsatzspektrum und die zentrale Bedeutung in zahlreichen zukunftsorientierten Anwendungs- und Forschungsbereichen unterstrichen werden. Dieses breite Spektrum an Technologien und Anwendungen wird in verschiedenen Arbeits- und Plenarsitzungen behandelt. Dafür haben Autoren insgesamt 115 Beiträge, 69 Vorträge in den Arbeitskreissitzungen und 46 Postervorträge, angemeldet. Für den vorliegenden Tagungsband wurden davon 80 Beiträge, 54 der Arbeitskreissitzungen und 23 aus den Poster-Sessions sowie zwei Plenarvorträge, eingereicht. Dafür sei allen Autoren ausdrücklich gedankt.

An der Vorbereitung der Dreiländertagung sind Mitarbeiter des Instituts Vermessungswesen und Geoinformation der FHNW, viele Helferinnen und Helfer, die DGPF-Arbeitskreisleiter sowie verschiedene Mitglieder der drei Partnerverbände aktiv beteiligt gewesen. Bei ihnen bedanken wir uns herzlich und stellen fest, dass dieses Engagement durch eine hohe Beteiligung belohnt wird.

Im Namen der drei Vorstände der drei Partnerverbände begrüßen wir Sie herzlich zur Dreiländertagung 2007 in Muttenz/Basel.

Prof. Dr. sc. techn. Stephan Nebiker

Präsident SGPBF



Prof. Dr.-Ing. Thomas Luhmann

Präsident DGPF



Dipl.-Ing. Gert Steinkellner

Präsident OVG



# **INHALTSVERZEICHNIS**

# PLENARVORTRÄGE

WALDHÄUSL, P.: 100 Jahre Österreichische Gesellschaft für Photogrammetrie	. 13
PFEIFER, N.: Tradition und Fortschritt in der Photogrammetrie - Prof. Kraus 1974 bis 2006 am I.P.F. der TU Wien.	23

### AUSBILDUNG

(Leitung: Prof. Dr.-Ing. habil. Jochen Schiewe)

35
41
51
59
69
79

# BILDANALYSE

# "Methodische Aspekte"

(Leitung: Dr.-Ing. Kirsten Wolff)

SCHIEWE, J.: Konzeption für eine objektspezifische und fuzzy logic Veränderungsanalyse.	87
CRUZ, C. & BOOCHS, F.: Reconstruction of Architectural Objects from 3D scanner survey.	95
RIES, C., FRANZEN, M., STEINNOCHER, K. & KRESSLER, F.: Der Österreichische Ansatz für Aufbau und Aktualisierung des Objektbereichs Bodenbedeckung im Digitalen Landschaftsmodell.	103

SAUR, G., EDRICH, M., HEINZE	, N. & KRÜGER, W.: Video-like MiSAR image	
sequence processing.		111

# "Nachwuchs vor"

# (Leitung: Prof. Dr.-Ing. Frank Boochs)

WENZEL, S., DRAUSCHKE, M. & FÖRSTNER, W.: Detektion wiederholter und symmetrischer Strukturen in Fassadenbildern.	119
HIRSCHMUGL, M., WENINGER, B., RAGGAM, H. & SCHARDT, M.: Die Ableitung von Forstinventurparametern aus digitalen Luftbildkameradaten.	127
GASSER, J. & GERVAIX, F.: Image pre-processing and vector extraction of paths and hicking trails.	135
NIEMEYER, I., LISTNER, C. & MARPU, P.R.: Change detection based on the object Features.	141
HAHN, C., WIJAYA, A. & GLOAGUEN, R.: Application of Support Vector Machine for Complex Land Cover Classification using Aster and Landsat Data.	149
GÄHLER, M. & SCHIEWE, J.: Biotoptypenmonitoring - Identifikation von Veränderungen mittels höchst auflösender digitaler Fernerkundungsdaten	155
THIEL, CH., THIEL, C., KNUTH, R. & SCHMULLIUS, C.: Analyse von ASAR APP Zeitserien in Sibirien zur Optimierung der Waldkartierung – Eine Studie im Rahmen von GSE Forest Monitoring.	163
DRAUSCHKE, M., BRUNN, A., KULSCHEWSKI, K. & FÖRSTNER, W.: Automatic Dodging of Aerial Images.	173
BUCHER, T.: Die DPP-Methode: ein einfacher empirischer Ansatz zur Korrektur atmosphärischer Effekte in HRSC-AX Scannerdaten.	181

### GEOINFORMATIONSSYSTEME

# "3D-GIS und digitale Globen"

(Leitung: Dipl.-Ing. ETH Hannes Eugster)

NEBIKER, S., CHRISTEN, M., EUGSTER, H., FLÜCKIGER, K., STIERLI, C.: Integration von mobilen Geosensoren in kollaborative virtuelle Globen.	189
WEHRLE, A. & SCHROTTER, G.: Integration von Geodatensätzen in Google Earth: Erarbeitung eines unabhängigen Informationssystems.	199
KUNZ, T., SCHMASSMANN, E. & O'SULLIVAN, W.: swisstopo's Topographic Geographic Information system TOPGIS.	207

# "Digitale Landschafts- und Geländemodelle"

(Leitung: Prof. Dr. rer. nat. Thomas H. Kolbe)

BRIESE, C., DONEUS, M., PFEIFER, N. & MELZER, T.: Verbesserte DGM-Erstellung mittels Full-Waveform Airborne Laserscanning.	215
OTEPKA, J., BRIESE, C. & PFEIFER, N.: Erweiterung der Linearen Prädiktion – Berücksichtigung zusätzlicher Linien-, Flächennormalen- und Krümmungsbeobachtungen.	223
SCHMIDT, K., NEBEL, K., RATZKE, HP., SMIT-PHILIPP, H. & WEISENSEE, M.: Hochwassersimulation im flachen Gelände – sind unsere Geobasisdaten ausreichend?	233
WAGNER, W., HOLLAUS, M., STEINNOCHER, K. & HOFFMANN, C.: Determination of urban land use based on airborne laser scanner and GIS data.	241

# INTERNATIONALE STANDARDISIERUNG

# (Leitung: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kresse)

KRESSE, W.: Statusbericht zur Standardisierung für Photogrammetrie und Fernerkundung.	251
HASTEDT, H., LUHMANN, T., PEIPE, J. & TECKLENBURG, W.: Überlegungen zur Software-Zertifizierung in der Nahbereichsphotogrammetrie.	257
STANEK, H.: Qualitätsmanagement Laser Scanning – Struktur, Erfassung und Umsetzung.	263
ARTUSO, R.: Praktische Methoden zur Verifikation von hochgenauen landesweiten Laser Höhenmodellen.	271
REULKE, R., DÖRSTEL, C. & SCHWEBEL, R.: Die Norm E DIN 18740-4 – Anforderungen an digitale Luftbildkameras und an digitale Luftbilder.	281

### INTERPRETATION VON FERNERKUNDUNGSDATEN

## "Methodik und Prozessierung"

(Leitung: Dr. habil. Horst Weichelt)

BALTSAVIAS, E., EISENBEISS, H., AKCA, D., WASER, L.T., KÜCHLER, M., GINZLER, C.	
& THEE, P.: Modeling fractional shrub/tree cover and multi-temporal	
changes using high-resolution digital surface models and CIR-aerial images.	287
LEGAT, K.: Direkte Georeferenzierung von Luftbildern – Theorie und praktische	
Erfahrungen.	299

BAUER, T. & SUCHENWIRTH, L.: Objektbasierte Bildinterpretation: kann der Mensch ersetzt werden? Überlegungen zur Automatisierung der visuellen Interpretation am Beispiel der Überwachung des Koka-Anbaus in Kolumbien.	307
WEIDNER, U. & BÄHR, HP.: Vergleich von pixel- und segmentbasierter Klassifizierung am Beispiel des Kaiserstuhls.	315
HESE, S. & SCHMULLIUS, C.: Classification of Image Structure and Context for Mapping of Terrestrial Crude Oil Contaminations.	323
SCHWANDER, A. & KELLENBERGER, T. W.: Objektorientierte geomorphologische Klassifikation von IKONOS Daten im alpinen Raum.	331
NEIDHART, H.: Digitale Wärmebedarfskarte aus Laserscanning.	339
SIMMEN, JL. & BOVET, S.: Landesweites Orthophoto dank der Digitalkamera ADS40.	347

# "Anwendungen im Umweltbereich"

(Leitung: Prof. Dipl.-Ing. Wolfgang Wagner)

BAUMGARTNER, M., ZAPPA, M., HONG, S. Z., GURTZ, J. & SCHÄDLER, B.: Verbesserung der Hochwasservorhersage des Yangtze / Drei-Schluchten- Gebiet (China).	353
BLASCHKE, T., HOFMANN, P., GEORG, I., SCHÖPFER, E., TIEDE, D., LANG, S., MÖLLER, M., ARAÚJO, E. & KUX, H.: Möglichkeiten und Grenzen der Fernerkundung für das Monitoring und Safeguarding informeller Siedlungen: Eine Synthese.	361
PEISCHL, S., GLOAGUEN, R. & NIEMEYER, I.: Modelling of soil moisture in agricultural areas using ENVISAT ASAR-data.	375

# "Anwendungen für Vegetationsuntersuchungen"

(Leitung: Dr. sc. nat. Mathias Kneubühler)

BÜHLER, Y., KNEUBÜHLER, M., BOVET, S. & KELLENBERGER, T.: Anwendung von ADS40 Daten im Agrarbereich.	381
HEROLD, M., SAMBALE, J., LINDNER, M., URBAN, M. & WEAVER, S.: Satellite based monitoring of the national forest resources in the pacific island state of Vanuatu.	391
ANNEN, A., NEBIKER, S. & OESCH, D.: Einsatz von Mikro- und Minidrohnen für Fernerkundungsaufgaben in der agrochemischen Forschung und Entwicklung.	399
VOHLAND, M. & MADER, S.: From HyMap Imagery to Spatially Distributed Vegetation Water Contents – A Comparison of Different Estimation Approaches Based on Canopy Reflectance Modelling.	407

# NAHBEREICHSPHOTOGRAMMETRIE

# "Students Session"

# (Leitung: Dr. sc. Techn. Nicole D'Apuzzo)

SCHROTTER, G. & FUA, P.: Design of a Multi-Camera Orientation and Calibration System for Human Surface Measurement and Motion Capture.	417
SAUERBIER, M., FUX, P., LINDSTAEDT, M., KERSTEN, T., PETERHANS, J. & BELKAÏD, M. Dokumentation und 3D-Modellierung der Petroglyphen von Chichictara (Peru) mittels terrestrischem Laserscanning und Photogrammetrie.	425
BANGE, L., PEIPE, J. & PRZYBILLA, HJ.: 3D-Dokumentation des Essener Domschatzes.	433

# "NAHBEREICHSPHOTOGRAMMETRIE"

(Leitung: Prof. I	DiplIng. Dr.	Norbert Pfeifer)
-------------------	--------------	------------------

GRUEN, A. & AKCA, D.: Mobile Photogrammetry.	441
PEIPE, J., RIEKE-ZAPP, D. & TECKLENBURG, W.: Genauigkeitsuntersuchung von Kameras mit Foveon-Farbsensoren.	453
MAYER, H.: Automatische Orientierung mit und ohne Messmarken. – Das Mögliche und das Unmögliche.	457
SCHNEIDER, D.: Kombinierte Bündelblockausgleichung mit Varianz- komponentenschätzung bei der Fusion terrestrischer Laserscannerdaten, Panorama- und zentralperspektivischer Bilddaten.	465
PUTZE, T.: Mehrmedienphotogrammetrie an schwer zugänglichen, komplexen Körpern.	475
REMONDINO, F.: Image-based detailed 3D geometric reconstruction of heritage objects.	483
GRÜNKEMEIER, A. & STAIGER, R.: Instrumentenuntersuchung des Laserscanners LMS Z420i von RIEGL.	493

# FERNERKUNDUNG IN DER GEOLOGIE

### (Leitung: Dr. Hans-Ullrich Wetzel)

03
505
17
29
37
547
53
59

# SENSOREN UND PLATTFORMEN

# "Digitale Luftbildkameras und deren Anwendungen"

(Leitung: Dr. sc. techn. André Streilein)

LAUENROTH, G.: Operational aspects of digital aerial mapping cameras.	565
GRENZDÖRFFER, G. & ZUEV, S.: Bestimmung des photogrammetrischen Genauigkeitspotentials des Online-Systems ANTAR zur luftgestützten Verkehrsdatenerfassung.	571
GRUBER, M. & SCHNEIDER, S.: UltraCamX, die neue digitale Luftbildkamera von Microsoft.	579

# "Datenqualität von Luftbildkameras und Datenfusion"

(Leitung: Dipl.-Ing. Michael Franzen)

JACOBSEN, K.: Potential großformatiger digitaler Luftbildkameras.	589
SPRECKELS, V., SCHLIENKAMP, A. & JACOBSEN, J.: Modelldeformationen - Zur geometrischen Genauigkeit digitaler Luftbildkameras.	599
LADSTÄDTER, R.: Softwaregestützte Kompensation temperaturabhängiger Bilddeformationen für die Vexcel UltraCam. WIEDEMANN, A., PETER, W. & SCHMITS, M.: Möglichkeiten und Einschränkungen des kombisitere Fischtzes diaiteler Lutbildkomeres und lutfasetützter	609
Laserscanner.	617

# "Sensorsysteme und Satellitenmissionen"

# (Leitung: Dr. Rainer Sandau)

GRUEN, A., KOCAMAN, S. & WOLFF, K.: High Accuracy 3D Processing of Stereo Satellite Images in Mountainous Areas.	625
EUGSTER, H.: Georegistrierung mittels Minidrohnen erfasster Videosequenzen – Ansätze und Genauigkeitsanalyse.	637
VALLET, J.: GPS/IMU and LiDAR integration to aerial photogrammetry: Development and practical experiences with Helimap System <sup>®</sup> .	649
WICKI, P. & LARANJEIRO, L.: Photogrammetrische Erfassung von Fliess- und Staublawinen mit digitalen Amateur-Kameras.	659
BÖRNER, A., HIRSCHMÜLLER, H., NEIDHARDT, M., NITZ, M., SCHEIBE, K., WOHLFEIL, J. & ZUEV, S.: Ableitung photogrammetrischer Produkte mit der MFC-Kamera.	667

### PLANETENFORSCHUNG

(Leitung: Prof. Dr.-Ing. Jörg Albertz)

SCHOLTEN, F., WÄHLISCH, M., GIESE, B., GWINNER, K., ROATSCH, T., MATZ, KD.,	
HOFFMEISTER, A., OBERST, J. & JAUMANN, R.: Photogrammetrische	
Anwendungen in der Planetenforschung.	675
GEHRKE, S.: Zur geometrischen und radiometrischen Modellierung der	
Mars-Oberfläche aus HRSC-Daten.	683

# ANHANG

GERVAIX, F. & BURGOS, B.: Imagery aggregation for environmental characterisation of vineyards.	695
NOHKA, F., Baumann, F., Briese, K. & Kayal, H.: Konzept eines orbitalen Sensors zur Beobachtung von kurzzeitigen Lichtphänomenen auf dem Mond.	701

AUTORENVERZEICHNIS		709
--------------------	--	-----

# 100 Jahre Österreichische Gesellschaft für Photogrammetrie

#### PETER WALDHÄUSL<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Die Geschichte der Österreichischen Gesellschaft für Photogrammetrie beginnt mit einem großartigen Feuerwerk: Selbstgründung, Gründung der Internationalen Gesellschaft unter Selbstaufgabe und Eingliederung als erste Sektion, Gründung des Internationalen Archivs für Photogrammetrie und Abhaltung des ersten Internationalen Kongresses. Heute ist sie 100 Jahre alt und kann stolz auf ihre Leistungen und ihre Fachleute zurückblicken. Die Motoren waren bedeutende Persönlichkeiten: Eduard Doležal, Karl Neumaier, Karl Rinner und Karl Kraus, daneben gab und gibt es noch eine große Anzahl hervorragender Wissenschafter und Fachkollegen aus den Reihen der Gesellschaft, zu viele, um hier auch nur erwähnt werden zu können. Zunächst wird die Gründung besonders unter die Lupe genommen. Dann werden größere Zeitabschnitte beschrieben und Wünsche für die Zukunft formuliert.

#### 1 Einleitung

Die nun hundertjährige Geschichte der Österreichischen Gesellschaft für Photogrammetrie kann man nicht isoliert betrachten, sondern nur unter Einbeziehung des historischen Umfeldes. Es begann in der österreichisch - ungarischen Monarchie. Sie überlebte zwei Weltkriege und zwei Diktaturen bis zur zweiten Republik Österreich im neuen Europa. Zu Beginn fuhr man mit dem Pferdegespann und den ersten Dampfeisenbahnen, heute hat jeder sein Auto und reist mit Expresszug und Flugzeug. Vor hundert Jahren war eine Reise nach Jena etwas Besonderes. Heute ist Brüssel der Arbeitsplatz vieler Politiker, die morgens an- und abends zurückreisen. Die Verständigung mit Fachkollegen erfolgte vor dem ersten Weltkrieg mit handgeschriebenen Reinschrift-Briefen, die tagelang unterwegs waren. Die Antwort dauerte Wochen. Heute unterhält man sich per Telephon und Email und entscheidet womöglich sofort, ohne über Distanzen auch nur noch nachzudenken. Seinerzeit brauchte man endlos lang, um auch nur einfache Rechnungen mit Logarithmentafeln zu lösen, heute haben wir den Multi-Gigahertz-Computer, mit dem wir Riesenaufgaben spielend erledigen. Vor hundert Jahren baute man noch Drachen, um mit einer Plattenkamera von oben photographieren zu können, heute haben wir Flugzeuge und Satelliten und nutzen allzeit aktuelle Digitalbilder von festen wie bewegten Beobachtungsstationen. Die Hundert Jahre Geschichte der Österreichischen Gesellschaft für Photogrammetrie sind daher auch Zeitgeschichte und müssen dementsprechend bewertet werden.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Peter Waldhäusl: Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien, Gusshausstr. 27-29/122, 1040 Wien, Österreich. Email: pw@ipf.tuwien.ac.at

#### 2 Die Gründerjahre 1907 – 1911

#### 2.1 Die Gründung der Österreichischen Gesellschaft für Photogrammetrie

In (LEGO, 1958) ist der Hergang der Gründung wie folgt beschrieben. 1905 wurde Professor Eduard Doležal (Abb. 1) als Nachfolger seines Lehrers und Förderers Prof. Schell nach Wien berufen. Er bemühte sich durch Veranstaltung von Vorträgen, aufklärend zu wirken und die Fachleute zu gemeinsamer Forschungsarbeit zusammen zu schließen. Seine Verbindungen mit dem Militärgeographischen Institut, das als Pflegestätte der Stereophotogrammetrie Weltruf hatte, seine Beziehungen zu Theodor Scheimpflug, dessen Versuche und Erfindungen die Aufmerksamkeit der ganzen Fachwelt auf Wien lenkten, und schließlich Doležals eigene Arbeiten auf photogrammetrischem Gebiet brachten es mit sich, dass sich ein ganzer Kreis von Interessenten um ihn schloss, und es bedurfte nur noch eines kleinen Anstoßes, um in der geschaffenen günstigen Atmosphäre die zahlreichen Freunde der Photogrammetrie zu gemeinsamer Arbeit zu vereinigen." Die (erste) Gelegenheit dazu habe sich nach einem Vortrag von Hauptmann Truck in der k.k. Geographischen Gesellschaft im Februar 1907 ergeben.



Abb. 1. Prof. Dr. Eduard Doležal (1862-1955)

Ladislaus von Klatecki, k.k. Obergeometer I. Klasse und als "L.v.K." Referent des Österreichischen Vereines für Vermessungswesen, berichtet (KLATECKI 1907): Über Einladung von Prof. Doležal kamen am 5. März 1907 in einem Hörsaale der TH Wien Freunde der Photogrammetrie zum Zwecke der Beschlussfassung zur Gründung einer photogrammetrischen Vereinigung zusammen. "In einer übersichtlichen Schilderung der vielen Verdienste österreichischer Fachmänner an der Förderung der Fortschritte auf diesem Wissensgebiete lenkte Prof. Doležal die Aufmerksamkeit seiner Zuhörer auf den Umstand hin, dass gerade in Wien, wo seit Jahren in mehreren Anstalten die Photogrammetrie in verschiedenen Anwendungen geübt wird, der besonders geeignete Boden und sehr günstige Verhältnisse zur Gründung der photogrammetrischen Gesellschaft zu finden seien. Die Ausführungen wurden vom überraschend

großen Auditorium, welches aus Vertretern einzelner Ministerien, aus Professoren, Ingenieuren, Militärangehörigen, sowie aus Technikern und Beamten bestand, mit großem Interesse entgegengenommen." Ein 12-köpfiger Vorbereitungsausschuss wählte Prof. Doležal als Obmann. "Wir hoffen, dass in der Österreichischen photogrammetrischen Gesellschaft" eine neue heimische Pflegestätte des geodätischen Wissens – die erste ihrer Art – vorbildend erstehen wird."<sup>2</sup>

Am 8<sup>3</sup>. Mai 1907 fand in den Räumen der Lehrkanzel für Geodäsie der Technischen Hochschule in Wien die glänzend besuchte konstituierende Versammlung statt, der schon die behördlich genehmigten Satzungen vorgelegt werden konnten. Doležal wurde als Vereinsobmann gewählt, Scheimpflug zum Schriftführer, Rudolf Rost zu einem der Kassenrevisoren. Ferner gab es noch 17 weitere Mitglieder mit klingenden Namen in der Vereinsleitung (LEGO 1958).

#### 2.2 Die Monatsversammlungen und die Gründung des Internationale Archivs für Photogrammetrie

Doležal veranlasste regelmäßige Monatsversammlungen der Österreichischen Gesellschaft für Photogrammetrie, die erste am 22.11.1907, in deren Rahmen Vorträge gehalten und neue Entwicklungen, Projekte und Möglichkeiten vorgestellt und diskutiert wurden. Doležal führte diese regelmäßigen Monatsversammlungen auch für den Österreichischen Verein für Vermessungswesen ein, die jeweils in der zweiten Monatshälfte stattfanden. Unter "Vereinsnachrichten" wurde in der Österreichischen Zeitschrift für Vermessungswesen (ÖZV) über jede der Monatsversammlungen berichtet, für jene des Vereines sowie jene der Gesellschaft.

Und gleichzeitig gründete Doležal nun auch das "Internationale Archiv für Photogrammetrie" (IAP), worin allerdings nur über die photogrammetrischen Belange ausführlich berichtet wurde. Auch diese Maßnahme wurde allgemein begrüßt. Ende Januar 1908 hatte die Gesellschaft 90 Mitglieder, die meisten wohl aus den Ländern der Monarchie, aber auch aus Deutschland und Russland. Die Monarchie war ein Vielvölkerstaat und schon daher international. Das damals in Heften erscheinende IAP war ein großer Wunsch Doležals gewesen. Es sollte die Funktionen einer aktuellen Fachzeitschrift und jene eines internationalen Fachkompendiums über alle Weiterentwicklungen der Photogrammetrie erfüllen und die Leistungen der Pioniere der Photogrammetrie ins rechte Licht rücken. Er hatte es auch geschafft, die Gelder für den Druck aufzutreiben. Im Juli 1909 berichtete er allerdings über große Schwierigkeiten mit der Druckerei. Die Bände I bis III erschienen jedoch pünktlich 1908 bis 1911, die Bände IV bis VI bis 1923.<sup>4</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Lego dagegen zieht die beiden Ereignisse im Februar und am 5. März zusammen und übersieht, dass erst nach einer Einladung für den Gründungsbeschluss die berichtete große Anzahl wichtiger Persönlichkeiten möglich gewesen sein kann.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Lego nennt hier den 5. Mai 1907. Das muss ein Irrtum sein, weil das ein Sonntag war. In den Vereinsnachrichten des Österreichischen Vereins für Vermessungswesen, deren Obmann ebenfalls Prof. Doležal war, findet man auf Seite 198 der ÖZV 1907 den 8. Mai 1907, und das war ein Mittwoch, der klassische Vereinstag. Lego hat das Datum aus dem Band I des Internationalen Archivs für Photogrammetrie S. 79 übernommen, das dort offenbar falsch ist.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Eine Liste aller ISPRS Archive findet sich unter http://www.isprs.org/publications/archives.html

#### 2.3 Die Umgründung zur Internationalen Gesellschaft 1909

1908/09 war Prof. Doležal Rektor der Technischen Hochschule Wien. In seiner Inaugurationsrede am 24.10.1908 ging es natürlich um die Photogrammetrie, aber auch um wesentliche soziale und wirtschaftliche Anliegen. 1909 wurde er von Sr. Majestät dem Kaiser durch die Verleihung des kaiserlichen österreichischen Ordens der Eisernen Krone III. Klasse ausgezeichnet (Abb.2), eine großartige Würdigung seiner Verdienste.



Abb.2: Kaiserlicher Österreichischer Orden zur Eisernen Krone III. Klasse<sup>5</sup>

Für den 15.-20. Juli 1909 reiste Prof. Doležal nach Dresden zum ersten internationalen Kongress für angewandte Photographie, wo er als Ehrenpräsident fungierte. Vom 4.–9. Oktober 1909 fand der I. Ferienkurs für Stereophotogrammetrie von Carl Pulfrich bei Carl Zeiss in Jena statt, an dem 46 Fachleute aus Deutschland, Österreich, Ungarn, Russland und Serbien teilnahmen. In Verbindung damit unternahm Doležal auch eine Studienreise zur Messbildanstalt Meydenbauers in Berlin. Er hatte damit hervorragende Kontakte zu den deutschen und internationalen Fachkollegen. Auf Basis vieler Gespräche (vor allem während des Ferienkurses) und zufolge der regen Anteilnahme von Angehörigen fremder Staaten an den Bestrebungen der Österreichischen Gesellschaft für Photogrammetrie wurde im Ausschuss der ÖGP die Gründung einer Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie (IGP) mit Sektionen in den einzelnen Staaten angeregt. In den Berichten zu den Monatsversammlungen 1908 und 1909 findet sich noch kein Wort darüber. Ebenso nichts steht im Bericht über die ordentliche Jahresversammlung der Gesellschaft am 24. Februar 1910, obwohl in dieser der Entwurf der neuen Statuten bewilligt worden ist, wie späteren Berichten zu entnehmen ist. Die Statuten müssen also in den Wintermonaten 1909/10 von Doležal und anderen Vorstandsmitgliedern erarbeitet worden sein. Mit Sicherheit kann angenommen werden, dass der Besuch Pulfrichs in Wien mit einem Vortrag in der Monatsversammlung am 11. Februar 1910 auch einer Diskussion der Statuten der IGP mit Doležal und den anderen Ausschussmitgliedern der ÖGP gegolten hat.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> aus www.sammlerecke.de

Es war vorgesehen, dass sich die Österreichische Gesellschaft auflöst und sofort danach als Sektion Österreich der IGP wiederersteht, wobei es ausländischen Mitgliedern frei bleibt, auch Mitglied der Österreichischen Sektion zu bleiben oder zu werden. Die (Statuten 1910) wurden nach Genehmigung durch das hohe k.k. Ministerium des Innern am 11.April 1910 von der hohen k.k. niederösterreichischen Statthalterei laut Erlass Z.V.-1361 genehmigt. Der Vollzug der Umgründung erfolgte schließlich in der außerordentlichen Versammlung der ÖGP und gleichzeitig konstituierenden Versammlung der IGP sowie der "Sektion Österreich der IGP" am 4. Juli 1910. Alle Vorschläge wurden einstimmig genehmigt. Der ehemalige Vorstand der ÖGP übernahm die Leitung der Sektion Österreich und interimistisch bis zum ersten Kongress auch die Führung der IGP., der für 1911 oder 1912 vorgesehen war, aber erst 1913 in Wien stattfand.

#### 2.4 Zur Gründung der Sektion Deutschland

Max (GASSER 1910) schrieb im Gründungsbericht der "Sektion Deutschland", dass sich im Oktober 1909 (5.10.1909) in Jena einige Kursteilnehmer zusammengefunden hätten, um nach einem Weg zu suchen, das in Jena konzentrierte Interesse für das photomechanische Messverfahren bei den Teilnehmern auch nach ihrem Weggange von Jena dauernd zu erhalten, was am besten durch die Gründung einer Vereinigung erreicht werde. 33 erklärten sich sofort bereit. Allgemeines wurde festgelegt, wie der Sitz in Darmstadt und die Beitragshöhe (10 bis 15 M). Zunächst sei ein enger Anschluss an die in Österreich bestehende Gesellschaft anzustreben. Eine eigene Zeitschrift sei zu teuer. Die Gespräche der von Gasser geleiteten deutschen Proponentengruppe mit Doležal zogen sich in die Länge, so dass die Sektion Deutschland offiziell erst zwei Jahre nach Jena im September 1911 die zweite Mitgliedssektion der IGP wurde. Doležal übernahm die Herausgabe des IAP im Eigenverlag, womit für die deutschen Kollegen eine Beitragshöhe von nur 12.- M möglich geworden war. 1911 hatte die Sektion Deutschland 57 Mitglieder.

### 3 1910 bis 1938

Der erste Internationale Kongress für Photogrammetrie fand vom 24.-26. September 1913 in Wien statt, verspätet, weil Doležal den Kongress gleichzeitig mit der Versammlung deutscher Naturforscher und Ärzte abhalten wollte. Die Österreichische Gesellschaft, wie sich die Sektion Österreich bald wieder nannte, hat zu der Zeit 250 Mitglieder. Am Kongress nahmen insgesamt 300 teil. Wegen des ersten Weltkrieges wurde der nächste Internationale Kongress erst 1926 in Berlin abgehalten, der dritte folgte 1930 in Zürich, dann der vierte in Paris und der letzte vor dem 2. Weltkrieg 1938 in Rom. Im Anfang im Kreis um Österreich? Das Internationale Archiv für Photogrammetrie wurde ab Band VII zum großen Periodenbericht und Kongressbericht, bei den Kongressen hat jedes Land sein Bestes gegeben und alles Neue, schon aus kommerziellem und nationalem Interesse, veröffentlicht. Dock und Doležal übernahen in den 3 Kongressperioden 1926-1938 jedes Mal eine Kommission der ISP (Terrestrische und Sonderanwendungen).

Die Zwischenkriegsjahre waren eine mühsame Zeit des nur langsamen Aufschwunges und der Weiterentwicklung der terrestrischen Stereophotogrammetrie. Das Vermessungswesen und die Photogrammetrie werden entmilitarisiert. Wieder war es Doležal, der wesentliche Initiativen setzte, die 1921 zum zivil-staatlich zentralisierten Bundesvermessungsamt, ab 1923 Bundesamt

für Eich- und Vermessungswesen, führten. Private Photogrammetrie gab es nur im Hobby-Umfang und im Umfeld der Technischen Hochschulen. Pioniere, wie Doležal, von Orel, Scheimpflug, Hübl, Rost, Starke und Kammerer, vor dem ersten Weltkrieg konnten sich in den Jahren der wirtschaftlichen Not und Bescheidenheit nach dem Krieg und dem Ende der Monarchie wegen wiederholter politischer Umbrüche, Nachkriegsnot, Inflation und Arbeitslosigkeit nicht entwickeln. Viele waren ins Ausland gegangen, nach Deutschland, Spanien und Amerika. Brasilien dankt heute noch der Österreichischen Mission für die Einführung der Photogrammetrie (DSG 1972). 1926 erkrankt Doležal und zieht sich mehr und mehr zurück, Lego, Dokulil und Dock vertreten ihn so gut es geht. Doležal zieht im Hintergrund weiter die Fäden.

### 4 1938 - 1945

Der mit politischer und militärischer Gewalt durchgeführte Anschluss Österreichs an das Deutsche Reich und damit auch die Eingliederung der Österreichischen Gesellschaft für Photogrammetrie in die Deutsche ist ohne Autorennennung in Bildmessung und Luftbildwesen (Gegründet 1926 mit dem Berliner Kongress) in der Diktion der Zeit beschrieben. Man erkennt deutlich den zensurierenden Co-Autor und die Zurückhaltung von Betroffenen (N.N., 1938). Doležal wird am 25. März, also 13 Tage nach dem Einmarsch der deutschen Truppen in Österreich, zum Ehrenpräsidenten der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie ernannt. Dem Berichte nach sprach Karl Lego der DGP den Dank im Namen des neuen Ehrenpräsidenten aus. Lego war unter Bewachung eines "zuverlässigen" Amtskollegen, den ich später im Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen kennengelernt habe. Seine begleitenden Dankesworte sind die eines politischen Fanatikers. Lego traf eine den Umständen Rechnung tragende Vereinbarung mit der DGP, wonach der Beitritt der ÖGP zur DGP unter Beibehaltung der Autonomie des "Landesvereins Österreich" gesichert gewesen wäre. Dem Auslande gegenüber wollte man gemeinsam auftreten. Am 17. Juni 1938 wurde durch Gauleiter Bürckel, dem Reichskommissar für die Wiedervereinigung Österreichs mit dem Deutschen Reich, und A. Hoffmann, dem Reichsamtsleiter und Stillhaltekommissar für Vereine, Organisationen und Verbände, die Österreichische Gesellschaft für Photogrammetrie aufgelöst. Ihre Mitglieder konnten wählen, ob sie in der DGP als Vollmitglieder (10 RM pro Jahr), als Freunde des Gaues Ostmark (kostenlose Teilnahme an Vorträgen u.dgl.) oder nicht mehr weitergeführt werden wollen. Die ÖGP war damit zur Gruppe Ostmark der DGP geworden, der neue Obmann war vom Vorsitzenden der DGP zu ernennen. Während des Zweiten Weltkrieges 1939 - 1945 erstarrte das Vereinsleben.

### 5 1945 - 1973

Am 6. Februar 1946 wurde das Bürckel-Hoffmann Dekret offiziell wieder außer Kraft gesetzt. Doležal, Lego, Rohrer, Barvir, Neumaier und eine langsam zunehmende Anzahl von Kriegsheimkehrern bereiteten eine neue Hauptversammlung vor. Am 21. März 1948 wurde ein neuer Vorstand gewählt: Obmann: Doležal, Obmann-Stellvertreter: Lego und Neumaier. In (LEGO 1948) wurden die Leistungen der Dienststellen in der Kriegs- und Nachkriegszeit ausführlich zusammengestellt. Die vielen Kleinprojekte scheinen aus heutiger Sicht bescheiden, sie waren jedoch bedeutender als so manches Großprojekt heute. Sie brachten das Zubrot zu den niedrigen Nachkriegsgehältern, sie ermöglichten den Aufbau photogrammetrischer Gesellschaften, wie der Alpenphotogrammetrie GmbH unter Gustav Höllhuber in Zusammenarbeit mit einer Gruppe von Ingenieurkonsulenten und Hochschulprofessoren. Langsam erholte sich die österreichische Photogrammetrie. Der neue Motor war Karl Neumaier, Leiter der Photogrammetrie, der Landesaufnahme und schließlich Präsident des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen



Abb. 3: Hon.Prof. Dr.h.c. Ing. Karl Neumaier (1898-1999)

und Honorarprofessor für Photogrammetrie an der TH Wien, der seine internationalen Verbindungen, ein Netzwerk von Altösterreichern und Freunden, zum Wohle der staatlichen wie der privaten Photogrammetrie und des gesamten Vermessungswesens geschickt einbrachte. Der Wiederaufbau verlangte viel Arbeit, der Marshallplan brachte Vollbeschäftigung. Das Vereinsleben im alten Stile Doležals wurde zu einem wichtigen Katalysator - besonders in den Nachsitzungen. Neumaier sorgte für die Anschaffung neuer Auswertegeräte, verbesserte sie in Zusammenarbeit mit der Firma Wild, ließ ein eigenes Vermessungsflugzeug anschaffen (Scottish Aviation Twin Pioneer, 1957) und versorgte so die österreichischen Photogrammeter mit Luftaufnahmen, wonach die terrestrisch-topographische Stereophotogrammetrie endgültig durch die Luftbildmessung abgelöst wurde. Er förderte aber auch die weitere Rationalisierung und Automatisierung der Landesaufnahme und des Katasterwesens durch systematischen Aufbau der EDV. Die Zeit der Handkurbelmaschinen und der graphischen Ausgleiche für Passpunkte und Streifen endete mit den Sechzigerjahren, in denen die ersten "Großrechner" gemeinsam vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen und dem Institut für Mathematik der TH Wien angeschafft wurden. Ein Präzisionsstereokomparator, gemeinsam für die TH Wien und TH Graz finanziert, bedeutete den Beginn der analytischen Photogrammetrie.

Wissenschaftlich ging nun auch wieder etwas voran: Lego, Neumaier und Barvir übernahmen drei Perioden lang die Kommission VI der IGP. Karl Rinner, ab 1959 Professor an der TH Graz, unterstützt von einer starken Österreicher-Gruppe, und Rudolf Burkhardt, Berlin, brachten den dreibändigen Photogrammetrie-Teil des Handbuches für Vermessungskunde von Jordan-Eggert-

Kneissl neu heraus. Rinner war unser aller wissenschaftliches Vorbild. Sein hervorragendes Lebenswerk fand eine ausgezeichnete Würdigung in der Festschrift zu seinem 70. Geburtstag. (MORITZ, LEBERL, MEISSL 1982)



Abb.4: Prof. Dr. Dr.h.c.mult. Karl Rinner (1912 - 1991)

Die Österreichische Gesellschaft arbeitete mit dem Österreichischen Verein für Vermessungswesen eng zusammen. Das Mitteilungsblatt der Gesellschaft wurde der Vereinszeitschrift beigelegt. 1960 bis 1964 übernahm Karl Hubeny die Kommission V (Nicht-topographische Anwendungen). Im Laufe der Zeit nahm die Anzahl der Vereinsvorträge ab. In Wien bestanden die Hochschulassistenten darauf, ihre Arbeiten in Vorträgen vorstellen zu dürfen. Einige Professoren der Vereinsvorstände sträubten sich zunächst, Nicht-Habilitierte auf Hochschulboden auftreten zu lassen, erklärten sich aber schließlich einverstanden, die Vorträge ihrer Assistenten einzubegleiten und die Diskussionen zu leiten. Ab dann gab es wieder monatliche Vereinsvorträge aus allen Fachgebieten, die von der ÖGP bzw. dem ÖVV gemeinsam mit der Arbeitsgemeinschaft der Assistenten Gelegenheit bot, Vortragserfahrung zu sammeln. Das belebte die Vereinstätigkeit deutlich. In der Folge unterstützten die Assistenten auch die Vortragsreihen in den anderen österreichischen Vereinszentren Graz, Innsbruck und Linz.

Die Doppelgleisigkeit von ÖGP und ÖVV mit verschiedenen Zuständigkeiten brachte aber auch eine gewisse gegenseitige Behinderung der Vortragsreihen. Das Angebot an die Mitglieder stieg. Der Doppelaufwand für die Betreuung des Vereines und der Gesellschaft, die finanziellen Schwierigkeiten für die Drucklegung der Zeitschrift ÖZV und des Mitteilungsblattes der ÖGP waren dann 1973 Anlass für eine Palastrevolution der jüngeren Generation, die in einer – wie immer – am gleichen Tag nacheinander angesetzten Hauptversammlung den Zusammenschluss der beiden Vereine abstimmen ließ und gewann. Friedrich Hrbek übernahm mit 12. April 1973 die Präsidentschaft des "Österreichischen Vereines für Vermessungswesen und Photogrammetrie", auf den damit alle Rechte und Pflichten sowie das Vereinsvermögen der ÖGP übergingen. Sekretär wurde Friedrich Blaschitz.

#### 6 1974 - 2007



Abb.5: Prof. Dr.h.c. Dr.-Ing. Karl Kraus (1939 - 2006)

Am 1.April 1974 hat Karl Kraus, gerade 35-Jahre alt, seinen Dienst als Institutsvorstand am Institut für Photogrammetrie angetreten. Seine Leistungen und Verdienste wurden zuletzt von (ACKERMANN, 2007) und (PFEIFER, 2007) gewürdigt. Aus der Sicht der Österreichischen Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation, deren neuer Name auch die Handschrift von Karl Kraus trägt, sind nicht nur die von ihm geleiteten Wiener Großveranstaltungen<sup>67</sup> und seine persönlichen Beiträge zu den Geodätentagen zu erwähnen, sondern auch seine Zuverlässigkeit und sein guter Rat im Vorstand, dem er von Anfang an und seit 1992 als Vizepräsident angehört hat. Er ist 32 Jahre lang ein maßgeblicher Motor im Bereich der Photogrammetrie gewesen. Bei

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> 7. Symposium of ICOMOS-CIPA, 16. – 19. Sept. 1981 in Vienna, Austria. Organised by: Bundesdenkmalamt (Hans Foramitti), University of Technology Vienna (Institute for Photogrammetry, Karl Kraus, Peter Waldhaeusl), Academy of Fine Arts Vienna (Franz Mairinger). Gottfried Boehm (Editor): "Photogrammetrie in der Architektur und Denkmalpflege". Bundesdenkmalamt Wien 1983, pp. 450.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> XVIII International Congress of Photogrammetry and Remote Sensing, 12.-18. July 1996 in Vienna, Austria. Symposium Director: Karl Kraus. Technical Director: Peter Waldhaeusl. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing Vol. XXXI/A (1998) and B1 to B7 (1996). Vienna.

den alle drei Jahre stattfindenden Geodätentagen hat sich Kraus besonders für die jungen Fachkollegen eingesetzt und ihnen in einer eigenen Sitzung die Möglichkeit zu öffentlichen Auftritten geboten. Bei Kollegen und Studenten war Kraus hoch geschätzt und überaus beliebt. Die Österreichische Gesellschaft für Vermessungswesen und Geoinformation (OVG) und die ISPRS, der er vier Jahre lang als Kongressdirektor im Council gedient hat, haben ihm viel zu verdanken. Zuletzt holte er für Wolfgang Kainz die Kommission IV nach Österreich (2004-2008) nachdem erst 2000-2004 die Kommission III von Franz Leberl in Graz betreut worden war. Karl Kraus hatte sich auf diese Dreiländertagung gefreut und hätte hier gerne Vorbereitungsgespräche für die 100-Jahrfeier der jetzt in Maryland, USA, registrierten ISPRS geführt, da ihm deren Heimkehr nach Österreich ein Herzensanliegen war.

### 7 Schlusswort

Seit ihrer Gründung hatte die Österreichische Gesellschaft für Photogrammetrie, die heute ein Teil der Österreichischen Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation ist, viele bedeutende Persönlichkeiten aufzuweisen, die hier weder vollständig noch gebührend erwähnt werden konnten. Sie dienten in ihr im Vorstand oder als einfache Mitglieder, als Wissenschafter, Erfinder, Entwickler oder Praktiker. Ich habe zu jeder der genannten Perioden einen ausgewählt, der mir und uns ein besonderes Vorbild, Kraus sagte Leitbild oder Leuchtturm, war und bleibt. Vorbild durch Wissen und Können, durch Geschick, Weitblick und Phantasie, Menschlichkeit und Teamgeist. Ich glaube, wir alle wünschen der Österreichischen Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation für alle ihre Sparten solche Persönlichkeiten. Dann muss uns um die nächsten 100 Jahre nicht bange sein

### 8 Literaturverzeichnis

- DSG 1972: A Missao Austríaca e o Servico Geográfico do Exércico. Diretoria de Servico Geográfico (DSG), Ministério do Exército, Brasil.
- GASSER, M., 1911: Zur Gründung der Sektion "Deutschland". IAP III 316-317.
- KLATETZKI, L.V. 1907: Erste photogrammetrische Vereinigung. ÖZV 87.
- LEGO, K., 1948: Die photogrammetrischen Arbeiten in Österreich von 1938 1948. Österreichischer Landesbericht. IGP Nachkriegskongress in Den Haag. ÖZV 1948, 71-83, 101-113.
- LEGO, K., 1958: Die Erfindung der Photogrammetrie und ihre Entwicklung in Österreich bis zur Gründung der österreichischen photogrammetrischen Gesellschaft. ÖZV 148 – 156, 162 ff.
- MORITZ, H., LEBERL, F., MEISSL, P., (HRSG.), 1982: Geodesia universalis. Festschrift Karl Rinner zum 70. Geburtstag. Mitteilungen der geodätischen Institute der TU Graz 40.
- N.N., 1938: Bildmessung und Luftbildwesen 13/2, 87 92;13/3, 141-143.
- PFEIFER, N., 2007: Tradition und Fortschritt in der Photogrammetrie. Prof. Kraus 1974 bis 2006 am I.P.F. der TU Wien. Dreiländertagung 2007 - gemeinsame Jahrestagung der SGPBF, DGPF und OVG, Basel, Schweiz.
- STATUTEN, 1910: Satzungen d. Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie. IAP III 306 ff.

# Tradition und Fortschritt in der Photogrammetrie Prof. Kraus 1974 bis 2006 am I.P.F. der TU Wien

#### NORBERT PFEIFER<sup>1</sup>

Zusammenfassung: "Tradition und Fortschritt in der Photogrammetrie" ist der Titel der Antrittsvorlesung, die Prof. Kraus 1975 an der Technischen Universität Wien gehalten hat (Kraus, 1977). Es hat sich gezeigt, dass er diesem Motto treu geblieben ist. Der vorliegende Beitrag soll einerseits Zeugnis über Hrn. Kraus und seine Tätigkeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, dem I.P.F., abgeben und andererseits auf die Entwicklungen, die er insbesondere in den letzten Jahren angestoßen hat, näher eingehen.

#### 1 Professor Karl Kraus

Eine erste Annäherung an Hrn. Kraus, geboren am 23. April 1939 in Obermichelbach in Deutschland, soll ein kurzer Wiener Lebenslauf geben. Nach der "PostDoc"-Zeit und Habilitation an der Universität Stuttgart wurde Hr. Kraus mit 1. April 1974 zum "ordentlichen Hochschulprofessor für Photogrammetrie an der Technischen Hochschule Wien" ernannt. Bis zu seinem unerwarteten Tod am 5. April 2006 in Berlin, wo er sich für eine wissenschaftliche Veranstaltung aufgehalten hat<sup>2</sup>, war er Vorstand des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien. Von 1983 bis 1987 war er Dekan der Technisch Naturwissenschaftlichen Fakultät und von 1987 bis 1989 Rektor an der TU Wien. Hr. Kraus, der diese Anrede mindestens ebenso schätzte wie "Professor", war Direktor des ISPRS-Kongresses im Jahr 1996. In diesen Positionen hat er eindrucksvoll sein organisatorisches Talent eingesetzt und unter Beweis gestellt.

Prof. Kraus war darüber hinaus aktiv in der OVG, der Österreichischen Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation, die die Dreiländertagung 2007 gemeinsam mit der Schweizer Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Bildverarbeitung und der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung veranstaltet, und ebenso aktiv in der ÖGK, der Österreichischen Geodätischen Kommission. Er pflegte ausgezeichnete Kontakte zum BEV, dem Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen Österreichs, sowie zu Landesvermessungsämtern und verschiedenen Bundesdienststellen, auch über Österreich hinaus, sowie zur privaten Wirtschaft, speziell auch zu Vermessungsbüros. An der Technischen Universität hat er sich als "technischer Konsulent" verstanden und es daher bewusst abgelehnt ein eigenes Büro zu betreiben. Das I.P.F. sollte zu niemanden aus der Wirtschaft in Konkurrenz treten und für alle offen sein.

Der erste und wichtigste Punkt der Forschungsvorhaben von Hrn. Kraus war laut den Verhandlungsunterlagen mit dem damaligen Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung im Dezember 1973 die Schaffung eines "topographischen Informationssystems". Die Beiträge zur

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Norbert Pfeifer: Institut f
ür Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universit
ät Wien Gu
ßhausstrasse 27-29, A-1040 Wien, Österreich

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Die dort vorgetragenen Forschungsergebnisse sind in (KRAUS, RESSL & RONCAT, 2006) zu finden.

Forschung und Lehre, zusammengetragen anhand der Liste seiner Veröffentlichungen zeugen von Breite, aber auch Fokussierung.

Seit seinen Anfängen in Wien haben ihn offenbar drei große Themen interessiert: Die Interpolation, die Topographie und der hybride Bündelblock. Aus dem ersten Themenbereich waren das speziell die Kleinste-Quadrate-Interpolation (KRAUS & MIKHAIL, 1972, KRAUS, 1974, KRAUS, 1998), auch als Kriging bekannt, und Genauigkeitsanalysen, die später zu Qualitätsanalysen (KRAUS, KAREL, BRIESE & MANDLBURGER, 2006) verallgemeinert wurden.

In der Topographie, dem zweiten Thema, war es vor allem das Digitale Geländemodell und seine Anwendungen, speziell das Orthophoto. Das gemeinsam mit der inpho GmbH. (www.inpho.de) erstellte Programmpaket SCOP belegt das große Interesse und den Drang, Forschung nicht nur für Publikationen sondern auch für die praktische Nutzung zu betreiben. SCOP, mittlerweile SCOP++, wird seit über 35 Jahren entwickelt (KRAUS, STEWARDSON & GSELL, 1972, BRIESE, PFEIFER & STADLER, 2001, ACKERMANN & KRAUS, 2004) und gemeinsam mit TopDM, dem Paket zur Verwaltung großer Punkt- und Liniendatenmengen, eingesetzt. Für die damalige Firma Wild in Heerbrugg entstand die Software SORA DOP zur Steuerung des Avioplans, eines der ersten Geräte in der Produktion zur differentiellen Umbildung (KRAUS, 1976).

Das dritte Thema, das für Prof. Kraus von Anfang an bedeutend war, war die hybride Ausgleichung, mit ersten Anwendungen in der Nahbereichsphotogrammetrie, also für Fassaden und in der Architektur allgemein, für Verkehrsunfälle und später auch in der Medizin. Dies wurde (und wird) mit dem Programm ORIENT zur hybriden Blockausgleichung gelöst (KAGER und KRAUS, 1976). Ab 1978 kamen die Nutzung von Satellitenbildern und die multispektrale Fernerkundung (KRAUS, 1979) für die Erfassung der Umwelt als zusätzliche Aufgaben in den Fokus. Dabei reichte die Anwendungspalette von Fragen zu Wasser und Schnee über Vegetation und Altlasten bis zu länderübergreifenden Nationalparks.

Im Jahr 1982 erschien die erste Auflage des Lehrbuchs "Photogrammetrie, Band 1, Grundlagen und Standardverfahren mit Beiträgen von P. Waldhäusl" (KRAUS, 1982), das derzeit in der 7. Auflage vorliegt und im Laufe der Jahre auf drei Bände erweitert wurde. Dieses Buch wurde in zahlreiche Sprachen<sup>3</sup> übersetzt, wodurch der Name Kraus stark mit der Grundausbildung in der Photogrammetrie verbunden wurde. Gemeinsam mit J. Jansa und W. Schneider hat er zusätzlich die Lehrbücher Fernerkundung I und II geschrieben. Als Lehrender hat Hr. Kraus seine Begabung komplizierte Sachverhalte auf das Wesentliche zu konzentrieren und einfach und klar darzustellen bis zuletzt in mehreren Vorlesungen an der TU Wien eingesetzt. In diesem Sinne organisierte er auch Hochschullehrgänge zu aktuellen Themen der Photogrammetrie, die auf reges Interesse und entsprechenden Teilnahme gestoßen sind.

Die erste Publikation zu räumlichen Datenbanken erschien 1986 (LOITSCH & KRAUS, 1986), und dieses Thema wurde – der Logik folgend – später um die Einbettung in Geographische Informationssysteme für topographische Zwecke erweitert. Beginnend mit dem Jahr 1997 fasste unter der Führung von Prof. Kraus das Airborne Laserscanning am I.P.F. Fuß (KRAUS, 1997, KRAUS &

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Zumindest: Norwegisch, Serbokroatisch, Griechisch, Französisch, Italienisch, Ungarisch, Ukrainisch, Englisch, Japanisch und Türkisch.

PFEIFER, 1998). Den Beginn machte die Methode der robusten Interpolation zur Trennung zwischen Vegetations- und Bodenpunkten sowie Genauigkeitsanalysen. Im Jahr 2000 erschien die erste Publikation zum Terrestrischen Laserscanning für Nahbereichsanwendungen, worin auch die Erstellung eines Orthophotos der Decke eines historischen Gebäudes mittels der Intensitätsmessungen diskutiert wird (PFEIFER, KRAUS, SCHWARZ & ULLRICH, 2000). Auf der Dreiländertagung in Konstanz, 2001, sprach Prof. Kraus, seines Erachtens, von einem Paradigmen-Wechsel in der Photogrammetrie (KRAUS, 2001): vom Vorwärtsschnitt zur – Kombination mit der – polaren Erfassung. Auch heute noch wird die Frage, ob «Laserscanning» «Photogrammetrie» ist, diskutiert, oft sogar emotional.

Im Jahr 2001 wurde das I.P.F. um die ordentliche Professur für Fernerkundung erweitert, die von Hrn. Wagner bekleidet wird. Die Radarfernerkundung wurde damit ein fester Bestandteil der Kompetenzfelder des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung.

Publikationen zur Schaffung eines topographischen Informationssystems vom Planeten Mars im Jahr 2002 eröffneten neue Anwendungsbereiche, Kooperationen und Weiterentwicklungen unter Bedachtnahme des Internet (DORNINGER, JANSA, BRIESE, MANDLBURGER & KRAUS, 2002). Die letzte große Innovation veranlasste Prof. Kraus in der detaillierten Untersuchung der Interaktion des Laserpulses mit reflektierenden Flächen und der Analyse des Full-Waveform Laserscanning ab 2004. Das ist auch ein bedeutendes Forschungsthema im Christian Doppler (CD)-Labor, das im Jahr 2003 am I.P.F. eingerichtet worden ist, und die Mitarbeiterschaft auf 35 Personen anwachsen ließ. Das CD-Labor für "Räumliche Daten aus Laserscanning und Fernerkundung" wird durch Firmenpartner und die öffentliche Hand gefördert. Mit dieser Vergrößerung ist, nachgerechnet von Prof. Peter Waldhäusl (KRAUS, 2003), das I.P.F. während der und durch die Dienstzeit von Hrn. Kraus um durchschnittlich eine Person pro Jahr gewachsen. In seinen Mitarbeitern hat er die Selbständigkeit gefördert, was nicht nur den Abgängern, sondern auch dem Institut als Organismus, sehr zugute gekommen ist.

Hr. Kraus war, wie schon eingangs erwähnt, aktiv in der ISPRS. Die ISP, ihre Vorgängerin, wurde 1910 durch Prof. Doležal in einem Hörsaal der Technischen Hochschule Wien gegründet. Die erste Sektion der ISP war die 1907 gegründete Österreichische Gesellschaft für Photogrammetrie (WALDHÄUSL, 2007). Prof. Kraus hat sich sehr für die Registrierung der ISPRS als gemeinnützige Gesellschaft in Österreich, ihrem Gründungsland, eingesetzt. International hat er besonders auch rege Kontakte zu den Ländern Osteuropas unterhalten, die ihm ein großes Anliegen waren, und so die Photogrammetrie über die Grenzen Österreichs hinaus gefördert. Durch die oben genannten Positionen, mit seiner Erfahrung und seinen Erfolgen in der Forschung, aber vor allem durch seine große Persönlichkeit, konnte er die Studierenden, die Absolventen, seine Mitarbeiter, öffentliche Körperschaften und die Wirtschaft im Umfeld der Photogrammetrie stark unterstützen und vielen als leuchtendes Vorbild, als "Leuchtturm" dienen. Besonders dankbar sind wir, die Kollegen am I.P.F., für seinen menschlichen Umgang und das "offene Ohr" für die Belange seiner Mitarbeiter.

### 2 Airborne Laserscanning

Eines der letzten Felder, mit denen sich Hr. Kraus intensiv beschäftigt hat, und das daher – in seinem Sinne – näher vorgestellt werden soll ist das Laserscanning. Besonders die Anwendung in der Topographie für das digitale Geländemodell sollen hier beleuchtet werden.

Die Gewinnung und Verarbeitung von Laserscanning-Daten, beginnt mit der Erstellung der Anforderungen hinsichtlich der Qualität der Messungen (relative und absolute Genauigkeit), Punktdichte, Footprint-Größe, Flugzeitpunkt, etc., mit der Flugplanung und einer, möglichst unabhängigen, Kontrolle derselben. Nach der Befliegung wird zuerst die Einhaltung der Flugplanung kontrolliert, bspw. Flughöhe und Punktdichte. Den nächsten Schritt stellt die Streifenausgleichung dar, bei der die Elemente der Kalibrierung, also der inneren Orientierung, sowie die äußere Orientierung bestimmt bzw. verbessert werden. Auch die innere Orientierung kann dynamische Komponenten haben.

Für topographische Zwecke ist der nächste Schritt die Ableitung der Geländekanten und danach die Filterung, bzw. Klassifizierung der Punkte. Eine automatische Auffindung der Geländekanten könnte – im Prinzip – im bewaldeten Gebiet besser ablaufen, wenn die Boden- und Vegetationspunkte bereits getrennt worden sind. Andererseits profitiert die Rekonstruktion der Geländekante, wenn die Klassifizierung noch nicht durchgeführt worden ist. Weil die Klassifizierung in erster Linie geometrische Kriterien zur Trennung von Vegetations- und Bodenpunkten nutzt, treten in der Regel kleine Abrundungen und eine Minderung der Deutlichkeit von Geländekanten auf. Dies führt zu einer schlechteren Rekonstruktion. Daher muss die Kantenrekonstruktion auch Vegetationspunkte berücksichtigen können. Danach kann die Klassifikation der gemessenen Punkte in Boden- und Nicht-Gelände-Punkte erfolgen, unter Berücksichtigung der Kanteninformation.

Der nächste Schritt ist die Berechnung des digitalen Geländemodells unter Berücksichtigung der Geländekanten und der Klassifikationsergebnisse, wobei Methoden, die die zufälligen Messfehler minimieren, eingesetzt werden sollen. Das so erhaltene Ergebnis kann hinsichtlich horizontaler und vertikaler Lagegenauigkeit analysiert werden. Nachdem Laserscanning keine identifizierbaren Punkte misst, ist immer ein Modell zur Qualitätsabschätzung erforderlich. Eine Ausdünnung der dichten Daten wird auf Basis dieses Modells, und nicht auf Basis der originalen, fehlerbehafteten Punkte durchgeführt. Diese Ausdünnung ist z.B. für Visualisierung oder hydraulische Modellierung von Interesse.

Dies stellt aus derzeitiger Sicht die optimale Verarbeitung der Laserscanning-Daten dar. Die Reihenfolge der Beschäftigung mit den einzelnen Themen war eher vom jeweils größten Problem getrieben und hat daher mit der Filterung begonnen, ist dann zur Streifenausgleichung gegangen, und hat dann erst die übrigen Prozessierungsschritte erfasst.

Für die Anwendungen Gebäudeextraktion und -rekonstruktion ist das Geländemodell keine unmittelbare Voraussetzung, doch die meisten Ansätze gehen von einem normalisierten Digitalem Oberflächenmodell (nDOM) aus, das sich als Differenz vom Oberflächenmodell und digitalem Geländemodell ergibt. Die oben beschriebenen Arbeitsschritte, speziell jene, die unter der Anleitung von Prof. Kraus am I.P.F. entwickelt worden sind, werden im Folgenden vorgestellt.

#### 2.1 Streifenanpassung

Die relative Genauigkeit von Laserscanning-Streifen im Überlappungsbereich (genauer: die Korrektheit der gegenseitigen Orientierung) kann untersucht werden, indem pro Streifen ein DHM (digitales Höhenmodell) und aus jeweils zwei überlappenden Streifen ein Differenzmodell berechnet wird. Abb. 1, links, zeigt Differenzmodelle über einem Gletscher farbcodiert und im Hintergrund die Schummerung des gesamten DGM (LENHART, KAGER, EDER, HINZ & STILLA, 2005). Diese Differenzen entstehen durch Aufnahmefehler während der Befliegung und aufgrund mangelnder Systemkalibrierung. Offset und Drift von GNSS<sup>4</sup>- und IMU-Systemen führen zu einer fehlerhaften äußeren Orientierung des Messsystems, die als systematischer Fehler in den Punktdaten auftritt. Darüber hinaus treten auch Fehler im Scanner selbst auf, wie bspw. eine mangelnde Synchronisation zwischen Entfernungs- und Spiegelstellungsmessung.



Abbildung 1: Höhendifferenzen benachbarter Streifen vor (links) und nach (rechts) de Streifenanpassung. Die Skala der Streifendifferenzen ist Meter (Lenhart et al., 2005).

Die Korrektur dieser Probleme, also der Diskrepanzen am Boden, bietet die Streifenanpassung, bei der simultan die Elemente der äußeren und inneren Orientierung des Multi-Sensor-Systems bestimmt werden, indem die beobachteten Differenzen an ebenen Patches minimiert werden. Aus Gründen der Einfachheit wurden vorerst datengetriebene, sensorunabhängige Methoden zur Elimination der Diskrepanzen angewandt, die den Methoden der photogrammetrischen Streifenausgleichung vor der praktischen Durchsetzung der Aerotriangulation in der "photographiegebundenen" Photogrammetrie ähnlich sind, nämlich Euklidische Transformationen bzw. Korrekturpolynome (KRAUS & PFEIFER, 2001, VOSSELMAN & MAAS, 2001). Die Streifenanpassung auf Basis eines Sensormodells (FILIN 2003, BURMAN 2000, KAGER 2004, siehe auch Abb. 2) bietet demgegenüber den Vorteil, dass keine zusätzlichen Artefakte in die gewonnenen Daten eingefügt werden und die Größe von Korrekturparametern einer unabhängigen Abschätzung der Fehlereinflüsse (bspw. GPS-Genauigkeit) gegenübergestellt werden kann. Damit ist diese Methode zuverlässiger. Durch Pass-Patches kann ebenso die absolute Orientierung verbessert werden.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> GNSS: Global Navigation Satellite System (GPS, Glonass, Galileo), IMU: Inertial Measurement Unit

Es erhebt sich noch die Frage nach der Messung der Diskrepanzen und der Minimierung derselben. Die Extraktion von homologen Patches kann durch automatische Segmentierung der Daten der einzelnen Streifen gewonnen werden, wobei die Verteilung über den gesamten Streifen von Bedeutung ist. Besonders die Verknüpfung eines Querstreifens mit Längsstreifen stützt die Streifenanpassung. Die Nutzung von einzelnen Patches bietet gegenüber einer flächenbezogenen Zuordnung, wie sie bspw. in ICP<sup>5</sup>-artigen



Abbildung 2: Prinzip der Streifenanpassung.

Algorithmen vorgenommen wird, folgende Vorteile: Effekte aufgrund der Blickrichtung und verschiedener Durchdringung der Vegetation treten nicht auf. Weiters kann die Menge der Beobachtungen und deren Verteilung kontrolliert werden.

Erfahrungen in großen Projekten, bspw. Streifenanpassung über Vorarlberg mit einer Fläche von  $2600 \text{km}^2$  und über 100 Streifen, haben gezeigt, dass die Genauigkeit i.d.R. um einen Faktor 2-3 gesteigert werden kann und eine Genauigkeit von  $\pm 10$ cm in der Höhe oder besser erreichbar ist. Besonders die Lagegenauigkeit kann durch die Streifenausgleichung gesteigert werden. Damit wird der Einfluss der Ungenauigkeit aufgrund der GNSS-Positionsbestimmung der dominierende Einflussfaktor.

#### 2.2 Geländekanten

Die Bedeutung von Geländekanten für die Modellierung des Geländes (KRAUS, 2000) ist aus der photogrammetrischen Aufnahme bekannt und hat sich zuerst bei weitabständiger Erfassung des Geländes durch photogrammetrische Profilierung bewährt. Mit dem Aufkommen der Methode Laserscanning, aber auch mit der automatischen Bildkorrelation, treten sehr hohe Punktdichten auf, die vorerst eine implizite Beschreibung der Geländekanten durch die große Anzahl von Punkten nahelegen. Allerdings messen diese Methoden keine expliziten Kantenpunkte, speziell das Laserscanning nicht, und stellen somit eine Tiefpassfilterung des Geländes dar. Auch zur Strukturierung und Analyse des Geländes sind explizite Geländekanten von Bedeutung. Daher sind auch aus dem Laserscanning Geländekanten abzuleiten, aber unter spezieller Berücksichtigung der Datenerfassungsmethode. In (Kraus & Pfeifer, 2001) ist ein Ansatz vorgestellt, der Flächen linkes und rechtes der Kante für einen kleinen Abschnitt entlang der Kante unabhängig modelliert. Die Geländekante ergibt sich dann durch den Schnitt der gegenüberliegenden Flächen (gleitendes Ebenenpaar). Diese stückweise Modellierung wird überlappend entlang der Geländekante weitergetrieben (Abb. 3, links). Die Kante wächst also entlang ihrer Lage.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> ICP: Iterative Closest Point

Dieser Ansatz wurde in verschiedener Weise weiterentwickelt. Einerseits lässt er sich auch auf Kanten aus terrestrischen Laserscanning-Aufnahmen anwenden (BRIESE, 2006). Damit ließe sich auch die Modellrekonstruktion aus terrestrischen Daten neu organisieren: nicht von der Fläche über die Kanten zu Punkten, sondern ausgehend von Kanten zu Flächen innerhalb derselben. Andererseits liefert der Prozess im Rahmen der Ausgleichungsrechnung Qualitätsmaße, die zur Überwachung eingesetzt werden können und so z.B. das Ende der Kante detektieren. Die Einbettung in die robuste Ausgleichung ermöglicht auch die Berücksichtigung bzw. Elimination von Vegetation und anderen Objekten (BRIESE, 2004).



Abbildung 3: Links: Überlappende patchweise Rekonstruktion einer Geländekante aus Laserscanning-Daten. Mitte: Einbettung der Rekonstruktion mittels zweier Ebenen in einen robusten Ansatz, der Punkte außerhalb der Geländefläche auf den einzelnen Flächen berücksichtigt. Rechts: Geländemodell aus Laserscanning mit Geländekanten.

#### 2.3 Filterung

Die Eigenschaft des Laserscannings durch Lücken in der Belaubung die Entfernung zum Boden, oder zumindest zu unter der Krone befindlichen Objekten zu messen, ist eine für den Erfolg des Laserscanning wichtigsten Eigenschaften. Die hohe Punktdichte, die eine neue Qualität von Geländemodellen auch im offenen Gelände ermöglicht hat sowie eine gute Grundlage für die vollautomatische Ableitung von Gebäudemodellen bietet, ist erst nach der Einführung der neuen Technologie erreicht und nutzbar geworden. Die Eigenschaft der Vegetations-"Durchdringung" ist auch die Grundlage für die Anwendungen in der Forstwirtschaft, die am I.P.F. erst in jüngster Zeit untersucht worden sind (HOLLAUS, 2006). Für fast alle dieser Anwendungen ist das Geländemodell eine Voraussetzung.

Die ersten Ideen zu der robusten Interpolation für die Berechnung von Geländemodellen hat KRAUS (1997) in der VGI, dem Publikationsorgan der OVG, veröffentlicht. Die wesentliche Idee ist die Trennung der geometrischen Eigenschaften des Bodens von den Eigenschaften der Datenerfassungsmethode. Erstere werden in einem Modell, konkret der Kovarianzfunktion der linearen Prädiktion (Kleinste-Quadrate-Interpolation) beschrieben. Das Wesentliche des Laserscannings ist Punkte auf oder über der Geländefläche zu messen. Die Verteilung der Punkte auf und über dem Boden kann stochastisch beschrieben und mittels einer Gewichtsfunktion behandelt werden. Das iterative Verfahren beginnt mit einer Interpolation der gesamten Punktmenge mit gleichen Gewichten. Die Abstände der gemessenen Punkte zu dieser Fläche werden zur Berechnung von Gewichten eingesetzt. Die Gewichtsfunktion ist dabei nicht symmetrisch zum Ursprung, sondern sie ist konstant eins, das ist der maximale Wert, für Punkte mit einem bestimmten Mindest-

abstand unterhalb der Fläche und fällt für höher liegende Punkte ab. Die Gewichte werden im nächsten Iterationsschritt bei der Berechnung der Fläche genutzt. Punkte mit einem großen Gewicht ziehen die Fläche an, Punkte mit einem geringeren Gewicht haben einen geringeren Einfluss auf den Verlauf der Fläche. So nähert sich die Fläche schrittweise dem Boden. Bekannt geworden ist dieser Ansatz vor allem durch den Aufsatz im ISPRS-Journal (KRAUS & PFEIFER, 1998). In Abb. 4 ist eine Perspektivansicht eines digitalen Oberflächemodells, berechnet aus Laserpunkten mit einem linearen Abstand von 3m (1997, im Auftrag der Stadt Wien) dem automatisch berechneten Geländemodell gegenübergestellt. Die Höhengenauigkeit war mit  $\pm 25$ cm im flachen und  $\pm 1$ m im steilen Gelände deutlich unter den derzeit erzielbaren Werten (KRAUS, HYNST, BELADA & REITER, 1997).

Der Ansatz zur robusten Geländemodellinterpolation ist kontinuierlich verfeinert worden, z.B. durch die Einbettung in eine hierarchische Herangehensweise (KRAUS & PFEIFER, 2001), die die nötige Durchmischung von Boden- und Nicht-Boden-Punkten auch im Stadtgebiet herstellt, und schließlich im Programmpaket SCOP++ umgesetzt worden (BRIESE, PFEIFER & STADLER, 2001). Die neuesten Entwicklungen erlauben individuelle Genauigkeiten pro Punkt (OTEPKA, BRIESE & PFEIFER, 2007) sowie die Ausnutzung der Full-Waveform für die Erstellung der Geländemodelle (BRIESE, DONEUS, PFEIFER & MELZER, 2007). Den ersten Anstoß zur vertieften Untersuchung der Physik des Laserscannings hat Hr. Kraus gegeben ("Wir müssen uns mehr mit der Interaktion des Laserstrahls mit dem Boden beschäftigen."), die Untersuchungen selbst (WAGNER, ULLRICH, DUCIC, MELZER STUDNICKA, 2006) hat er nicht geleitet.



Abbildung 4: Digitales Oberflächenmodell (links) und Geländemodell (rechts).

#### 2.4 Ausdünnung

Die Datenerfassung mittels Airborne Laserscanning ermöglicht eine detailreiche, engmaschige Beschreibung der Topographie im DGM zum Preis einer um mehrere Zehnerpotenzen gestiegenen Datenmenge. Aufbauend auf einem von zufälligen Messfehlern bereinigten DGM, kann das Datenvolumen allerdings durch den Einsatz von geeigneten Strategien erheblich reduziert werden. Ein Ansatz zur Reduktion hybrider Geländemodelle bestehend aus einem regelmäßigen Raster und eingeketteten Geländekanten ist in (BRIESE & KRAUS, 2003) beschrieben. Als Reduktionskriterium wird dabei die maximale Extrapolationsweite herangezogen. Es handelt sich dabei um eine Grundrissdistanz, welche sich aus der lokalen Geländekrümmung und -neigung errechnet, und welche angibt, wie viele Punkte in der Umgebung eines DGM-Gitterpunktes eingespart werden können, ohne eine vom Benutzer vorgegebene Approximationsgenauigkeit zu

überschreiten. Gemäß dem Grundgedanken des Progressive Samplings werden dabei vom Groben ins Feine jene Rasterpunkte selektiert, die zur Beschreibung der Geländeoberfläche mit der gewünschten Approximationsgenauigkeit erforderlich sind. Die Unterteilung der zunächst groben Zellen erfolgt dabei als Quad-Tree.

In (MANDLBURGER, 2006) ist dieser Ansatz im Sinne einer adaptiven Dreiecksvermaschung (Adaptive TIN refinement) weiterentwickelt worden. Ausgehend von einer zunächst groben Triangulierung werden dabei solange zusätzliche DGM-Punkte in das TIN eingefügt, bis der vertikale Abstand zum engmaschigen, gefilterten DGM kleiner als die geforderte Approximationsgenauigkeit ist. Das Einfügen zusätzlicher Punkte kann regelmäßig (als Quad-Tree) oder unregelmäßig erfolgen. In Abhängigkeit der Approximationsgenauigkeit und der Geländeform lassen sich auf diese Weise Reduktionsraten von bis zu 99% erreichen. Die Abb. 5 zeigt links das originale hybride DGM und rechts das adaptiv verfeinerte TIN.



Abbildung 5: Originales DGM aus Laserscanning mit Geländekanten und ausgedünntes TIN unter Beibehaltung der Linieninformation und einer maximalen Abweichung von 20cm.

### 3 Schlussfolgerungen

Die vorgestellten Arbeiten zum Airborne Laserscanning sind von Hrn. Prof. Kraus mit großem Interesse betrieben worden. Die Arbeiten am I.P.F. gehen darüber noch hinaus, speziell ist nicht auf die Ableitung von Gebäudemodellen (ROTTENSTEINER & BRIESE, 2004) und auf das terrestrische Laserscanning eingegangen worden.

Während dieser 10 Jahre der intensiven Beschäftigung mit dem Laserscanning hat Hr. Kraus auch anderen Bereichen der Photogrammetrie großes Interesse entgegengebracht. In der Topographie war es speziell die dritte Dimension und das Management der Daten, in der Fernerkundung die Bearbeitung umweltrelevanter Fragestellungen. Das Laserscanning hat dabei als Verstärkung dieser Themen gewirkt. Bei allen Entwicklungen, die wissenschaftlich interessant waren, war es Hrn. Kraus wichtig diese soweit zu treiben, dass sie auch von der Wirtschaft eingesetzt werden können. Über die Zeitspanne der 100-jährigen Geschichte der Photogrammetrie in Österreich, markiert durch die Gründung der Österreichischen Gesellschaft für Photogrammetrie 1907, hat die Photogrammetrie eine große Entwicklung durchgemacht und viel erreicht. Mit den momentanen Neuerungen technischer und mathematischer Natur bleibt das Feld sehr spannend. Über 32 Jahre hat Hr. Kraus einen sehr großen Beitrag zur Photogrammetrie und besonders auch für das Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung geleistet. Seinen Mitarbeitern wird neben seiner fachlichen Kompetenz vor allem seine menschliche Größe in Erinnerung bleiben.

#### 4 Literaturverzeichnis

- ACKERMANN & KRAUS, 2004. Reader Commentary: Grid Based Digital Terrain Models. GEO Informatics 7.
- BRIESE, 2004. Breakline Modelling from Airborne Laser Scanner Data. Dissertation, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien.
- BRIESE, 2006. Structure line modelling based on terrestrial laserscanner data. IAPRS, XXXVI-5, Dresden, Deutschland.
- BRIESE, DONEUS, PFEIFER & MELZER, 2007. Verbesserte DGM-Erstellung mittels Full-Waveform Airborne Laserscanning. Dreiländertagung 2007 – gemeinsame Jahrestagung der SGPBF, DGPF und OVG, Basel, Schweiz.
- BRIESE & KRAUS, 2003. Datenreduktion dichter Geländemodelle. zfv 128(5).
- BRIESE, PFEIFER & STADLER, 2001. Derivation of Digital Terrain Models in the SCOP++ environment. Proceedings of OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Terrain Models, Stockholm, Sweden.
- BURMAN, 2000. Adjustment of laser scanner data for correction of orientation errors. IAPRS 33/B3.
- DORNINGER, JANSA, BRIESE, MANDLBURGER & KRAUS, 2002. High Quality Visualizations and Analysis of the Mars Surface. ASI & ISPRS Workshop, Sicily, Italy.
- FILIN, 2003. Recovery of systematic biases in laser altimetry data using natural surfaces. PE&RS 69(11).
- HOLLAUS, 2006. Large Scale Applications of Airborne Laser Scanning for a Complex Mountainous Environment. Dissertation, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien.
- KAGER & KRAUS, 1976. Gemeinsame Ausgleichung photogrammetrischer, geodätischer und fiktiver Beobachtungen. Geowissenschaftliche Mitteilungen der Studienrichtung Vermessungswesen der TU Wien, 8.
- KAGER, 2004. Discrepancies between overlapping laser scanner strips simultaneous fitting of aerial laser scanner strips. IAPRS 35/B1.
- KRAUS, 1974. Untersuchung zur Genauigkeit der Interpolation nach kleinsten Quadraten. ZfV 99(5).
- KRAUS, 1976. Applications of a Digitally-Controlled Orthophoto Instrument. 13<sup>th</sup> International Congress for Photogrammetry, Helsinki, Finnland.
- KRAUS, 1977. Tradition und Fortschritt in der Photogrammetrie. Antrittsvorlesung der Technischen Universität Wien, Nr. 54.
- KRAUS, 1979. Zur Theorie der Klassifizierung multispektraler Bilder. Bildmessung und Luftbildwesen (4).

KRAUS, 1982. Photogrammetrie. Band 1: Grundlagen und Standardverfahren. Dümmler.

- KRAUS, 1997. Eine neue Methode zur Interpolation und Filterung von Daten mit schiefer Fehlerverteilung. VGI 85(1).
- KRAUS, 1998. Interpolation nach kleinsten Quadraten versus Krige-Schätzer. VGI 86(1).
- KRAUS, 2000. Photogrammetrie. Band 3: Topographische Informationssysteme. Dümmler.
- KRAUS, 2001. Laser-Scanning Ein Paradigma-Wechsel in der Photogrammetrie. Publikationen der DGPF 10.
- KRAUS, 2003. Professor Peter Waldhäusl zum 70. Geburtstag. PFG(1).
- KRAUS, HYNST, BELADA & REITER, 1997. Topographische Daten in bewaldeten Gebieten Ein Pilotprojekt mit Laser- Scanner-Daten. VGI 85(3).
- KRAUS, KAREL, BRIESE & MANDLBURGER, 2006. Local Accuracy Measures for Digital Terrain Models. Photogrammetric Record 21(116).
- KRAUS & MIKHAIL, 1972. Linear Least Squares Interpolation. Photogrammetric Engineering 38.
- KRAUS & PFEIFER, 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. ISPRS Journal 53.
- KRAUS & PFEIFER, 2001. Advanced DTM Generation from Lidar Data. IAPRS, XXXIV-3/W4, Annapolis, Maryland.
- KRAUS, RESSL & RONCAT, 2006. Least Squares Matching for Airborne Laser Scanner Data. 5<sup>th</sup> International Symposium Turkish-German joint Geodetic Days. Berlin, Deutschland.
- KRAUS, STEWARDSON & GSELL, 1972. Digital Automatic Contouring System. 12<sup>th</sup> Congress of the International Socienty of Photogrammetry, Ottawa, Kanada.
- LENHART, KAGER, EDER, HINZ & STILLA, 2005. Hochgenaue Generierung des DGM vom vergletscherten Hochgebirge Potential von Airborne Laserscanning. Mitteilungen des BKG, 36.
- LOTISCH & KRAUS, 1986. Topographic Information and Archiving Software (TOPIAS). IAPRS XXVI/4, Edingburgh, Großbrittanien.
- MANDLBURGER, 2006. Topographische Modelle für Anwendungen in Hydraulik und Hydrologie. Dissertation, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien.
- OTEPKA, BRIESE & PFEIFER, 2007. Erweiterung der linearen Prädiktion Berücksichtigung zusätzlicher Linien-, Flächennormalen- und Krümmungsbeobachtungen. Dreiländertagung 2007 – gemeinsame Jahrestagung der SGPBF, DGPF und OVG, Basel, Schweiz.
- PFEIFER, KRAUS, SCHWARZ & ULLRICH, 2000. Nahbereichs-Laser-Scanner für die Innenraumaufnahme. 13. Internationaler Kongress für Ingenieurvermessung. Wittner.
- ROTTENSTEINER & BRIESE, 2004. Automatische Erfassung von Gebäudemodellen aus Laserscannerdaten und die Integration von Luftbildern. PFG (4).
- VOSSELMAN & MAAS, 2001. Adjustment and Filtering of raw Laser Altimetry Data. OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models, Stockholm, Sweden.
- WALDHÄUSL, 2007. 100 Jahre Österreichische Gesellschaft für Photogrammetrie. Dreiländertagung 2007 – gemeinsame Jahrestagung der SGPBF, DGPF und OVG, Basel, Schweiz.
- WAGNER, ULLRICH, DUCIC, MELZER & STUDNICKA, 2006. Gaussian Decomposition and Calibration of a Novel Small-Footprint Full-Waveform Digitising Airborne Laser Scanner. ISPRS-Journal 60(2).

# Neue Wege der Fernerkundung im Geographieunterricht

#### MONIKA REUSCHENBACH<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Im folgenden Beitrag wird anhand konkreter Beispiele verdeutlicht, wie der bisher mangelhafte Zugang zur Fernerkundung im Geographieunterricht optimiert werden kann. Konkretisiert wird dies an Aufgabenstellungen mit Luft- und Satellitenbildern für Schüler-/innen, sie sind zentraler Bestandteil eines größeren Konzeptes zur Integration der Fernerkundung in die Schule. Neu am Konzept sind relativ einfache Zugänge zu den Bildmaterialien und der Einbezug der Aufgabenstellungen in eine kompetenzorientierte Unterrichtgestaltung. Vorgestellt wird, wie Fähigkeiten besonders in den Bereichen ,Visuelles Lernen', "Methodenkompetenz' und ,räumliche Orientierungsfähigkeit' erworben und eingeübt werden können. Es soll aber auch aufgezeigt werden, wo die weiteren Handlungsfelder des Anliegens liegen.

### 1 Einleitung

Bis heute beschränkt sich die Vermittlung von Zielen und Inhalten der Fernerkundung weit gehend auf Universitäten. Ausserhalb davon ist die Disziplin eher unbekannt. Wer sich im Schulunterricht mit den Aufgabenbereichen der Fernerkundung befassen und entsprechende Methoden im Unterricht einsetzen möchte, sieht sich mit einigen Schwierigkeiten konfrontiert.

Als methodische Disziplin mit typisch geogra phischen Inhalten sollte die Fernerkundung aber auch im Geographieunterricht einen wichtigeren Platz als heute einnehmen, da sie einen wertvollen Beitrag zur geographischen Bildung leiste n kann. Insbesondere durch Beschäftigung mit Luft- und Satellitenbildern werden bei Schüler- /innen vielfältige methodische Kompetenzen gefördert, die über die Schule hinaus reichen.

Der Aufsatz zeigt, wie die Fernerkundung am Beispiel der Arbeit mit Luft- und Satellitenbildern stärker und nachhaltiger in den Geographieunterricht (7. – 12. Klasse, Sek I und Sek II) eingebettet werden kann. Nachdem im Folgenden die ge genwärtige Situation kurz vorgestellt wird, verdeutlichen ausgewählte Praxisbeispiele neue Wege zur Integration der Fernerkundung. Anhand dieser Beispiele wird aufgezeigt, welche Kompetenzen die Schüler-/innen bei dieser Arbeitsform erwerben und warum der vorgest ellte Zugang, besonders zur Lu ft- und Satellitenbildarbeit, erfolgreich zu werden verspricht. Weitere Schritte von Seiten der Wirtschaft, der Wissenschaft und der Schulpolitik runden den Beitrag im Sinne eines Ausblickes ab.

### 2 Gegenwärtige Situation

In einer Untersuchung zur Bedeutung der Fe rnerkundung in Schulen Deutschlands und der Schweiz wurden Lehrpersonen zum Stellenwert der Fernerkundung im Unterricht befragt, Lehrpläne im Hinblick auf die Einbettung der methodisc hen Disziplin überprüft und aktuelle Lehrwerke nach Hinweisen zur Arbeit mit Luft- und Satellitenbildern analysiert.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Monika Reuschenbach, Geographisches Institut der Universität Zürich, Hubstrasse 17, CH - 8303 Bassersdorf, mreuschenbach@gmx.ch
Die befragten Lehrkräfte stehen der Fernerkundung grundsätzlich positiv gegenüber, sie verwenden Satellitenbilder hauptsächlich zu Anscha uungszwecken bei physisch-geographischen Themen. Sie stellen aber auch die aufwändige Ei narbeitungszeit in die Thematik und Probleme bei der Beschaffung geeigneter Unterrichtsmaterialie n fest. Zudem ist ein Vorbehalt gegenüber den komplex erscheinenden Fernerkundungsgrundlagen feststellbar.

In rund einem Drittel der untersuchten Lehrpläne finden sich Hinweise darauf, im Unterricht explizit mit Luft- oder Satellitenbildern zu arbeiten. Das ist relativ wenig, wenn man bedenkt, dass die höchste Verbindlichkeit von Unterrichtsinhalte n durch die Lehrplanintegration gewährleistet wird (HASSENPFLUG, 1998:53). Dennoch lässt sich durch die Anbindung an Unterrichtsthemen oft ein Bezug zur Fernerkundung herstellen (Oberflächenformen, Bevölkerungsverteilung usw.).

In Lehrbüchern haben Luft- und Satellitenbilder häufig illustrativen Charakter, Aufgabenstellungen zu den Bildern liegen kaum vor. In Schulzeits chriften kann man sich durch Fachartikel umfassend in die Aufgabengebiete und Techniken der Fernerkundung einarbeiten, die Aufsätze sind aber häufig anspruchsvoll und für den Unterrich t ungeeignet. Auch hier liegen nur wenige ansprechende Aufgabenstellungen vor. Bemerkenswer t ist, dass Schüler-/innen im Alltag häufig mit Satellitenbildern konfrontiert sind (N EUMANN-MEYER, 2005:167), im Unterricht aber kaum damit gearbeitet wird. Aus den Untersuchungen lässt sich ableiten, dass die Lehrpersonen zu wenig wissen, wie sie mit Luft- und Satellite nbildern arbeiten können und wie die Einbettung methodischer Kompetenzen trotz inhaltlicher Anforderungen konkret umgesetzt werden soll.

## 3 Ein neuer Zugang zu Luft- und Satellitenbildern

An zwei Beispielen soll aufgezeigt werden, wie eine Form der Auseinandersetzung mit der Fernerkundung von Schüler-/innen in Zukunft aussehen kann. Die Arbeitsweise unterscheidet sich von anderen publizierten Vorschlägen vor alle m durch den phänomenologischen Zugang zu den Luft- und Satellitenbildern. Zudem ermöglichen die Aufträge sowohl die Bildbetrachtung als auch die Bildinterpretation durch möglichst selb ständiges Arbeiten. Auf diese Weise erwerben die Schüler-/innen nicht nur inhaltliche sondern auch methodische und visuelle Kompetenzen.

### 3.1 Nacht in Amerika



Abb. 1: Nachtbild USA (DLR)

Aufgabenstellungen für die Schüler-/innen:

- Betrachte das Bild und halte fest, was auf diesem Bild dargestellt wird.
- Benenne die topographischen Merkmale (Städte, Flüsse, Gebiete, Länder usw.). Versuche es zuerst ohne Atlas.
- Wie lässt sich erklären, da ss in der östlichen Hälfte der USA viel mehr helle Flecken zu sehen sind als im Westen? Woher stammen die Flecken?

Kannst du aus dieser Erklärung Rückschlüsse auf

- den Energiehaushalt Amerikas ziehen?
- Rechne aus: Bei jedem US-Bürger / jeder US-B ürgerin brennt zum Aufnahmezei tpunkt eine Glühbirne à 60 Watt. Wie viel Strom wird folglich vom Staat bereitgestellt werden müssen?

Recherchiere im Internet die Bevölkerungszah I Amerikas und bestimme das Ergebnis. Vergleiche die Zahl mit dem Verbrauch in Deutschland oder der Schweiz.

 Überlege, wie eine Lichtkarte von Asien, Afri ka oder Europa aussähe. Überprüfe deine Vermutungen mit Bildern aus dem Internet.

Mit der Aufgabe werden besonders folgende Kompetenzen erworben: Fachwissen der Humangeographie, topographisches Wissen, Informationsverarbeitung, Kommunikation, Bewertung.

#### 3.2 Feuer in Australien



Abb. 2: Ostküste Australien (NASA)

#### Aufgabenstellungen für die Schüler-/innen:

Australien wird regelmässig von Waldbränden heimgesucht. Auf dem Satellitenbild siehst du einen Ausschnitt von Ostaustralien, Brandherde sind rot gekennzeichnet.

- Beschreibe die Landschaft im dargestellten Bildausschnitt: deute die Farben, die du erkennst.
- Nimm einen Atlas zur Hilfe und überprüfe, ob im abgebildeten Ausschnitt auch Städte von den Bränden betroffen sind. Um welche Städte könnte es sich handeln?
- Beurteile die Gef
   ährlichkeit dieser Br
   ände f
   ü r Menschen und die Natur. Beachte dabei die Distanzen zwischen den einzelnen Feuern, dein e gesch
   ätzte Ausdehnung, die N
   ähe zu Siedlungen oder Strand und die Windrichtung. Begr
   ünde deine 
   Überlegungen!
- Erkläre, was es bedeut et, wenn es in dieser Region brennt. Erstelle eine Liste mit Auswirkungen auf die Natur und auf die Menschen. B eachte dabei, dass es kurzfristige und längerfristige Auswirkungen gibt.
- Das Bild wurde einen Tag nach Beginn der Wa ldbrände aufgenommen. Überlege, welche Bedeutung Satellitenbilder bei Waldbränden haben. Stelle Vor- und Nachteile von Luft- und Satellitenbildern im Bezug auf Waldbrände zusammen und entscheide, wofür und wann welche Bildart (Luft- oder Satellitenbild) geeignet ist.

Mit der Aufgabe werden besonders folgende Kompetenzen erworben: Fachwissen der Physischen Geographie, Mensch-Umwelt-Beziehunge n, topographisches Wissen, Kommunikation, Bewertung, Grundlagen der Fernerkundung.

### 3.3 Analyse der Aufgabenstellungen

Die jeweils ersten Aufträge weisen auf die intensive Bildbetrachtung hin. Die Bilder sprechen die Schüler-/innen emotional an, sie lösen sofort Erkenntnisse aber auch Fragen und Neugier aus. Dies ist ein wichtiger Ansatz im Hinblick au f die nachhaltigere Integration der Fernerkundung: Lehrpersonen und Schüler-/innen sollen gleicherma ssen von der Faszination der Bildmaterialien angesteckt werden und diese zum Anlass nehmen, über das Bild zu sprechen, es als Informationsquelle für geographische Sachverhalte zu verwenden und damit (oder mit weiteren Materialien) zu arbeiten. Immer dient die Bildbeschrei bung einer Interpretation der Sachverhalte. Die Verknüpfung der beiden Formen im visuellen Le rnprozess läuft automatisch ab und kann kaum getrennt werden. Damit die Schüler-/innen ihre

Begründen von Meinungen angehalten. Dieses Prin zip bewährt sich sehr, die Bildbetrachtung wird dadurch überprüft und differenziert.

Gleichzeitig mit diesen ersten Fragen wird auch das Vorwissen der Schüler-/innen einbezogen und aktiviert. Sie versuchen, das Bild geographisc h und thematisch einzuordnen, stellen fest, etwas Ähnliches schon einmal gesehen zu haben und bringen ihre Gedanken in den Unterricht ein. Oft wird mit einem der ersten Auftrag auch de r "Entdeckersinn" der Schüler-/innen geweckt: sie müssen etwas erkennen, suchen und finden, aufspüren, herausfinden. Dies wirkt motivierend und der Lerneifer setzt ein. Auf diese Weise findet in teressiertes, vertieftes und nachhaltiges Lernen statt.

Beide ausgewählten Beispiele stellen Themen des regulären Geographieunterrichtes dar, können also problemlos in normale Lektionen integrie rt werden. Die Auswahl der Aufgabenstellungen kann beliebig gekürzt oder erweitert werden. Dadurch, dass die Auffräge keine allzu detaillierten Kenntnisse der Fernerkundung verlangen, ist die Einarbeitungszeit der Lehrpersonen etwa gleich gross, wie für andere Lektionen. Anhand der Luft- und Satellitenbilder wird auch das Anliegen der methodischen Kompetenzförderung ernst genommen und aufgezeigt, wie am und mit dem Bild gearbeitet werden kann.

Wo es sinnvoll erscheint (Bsp. Waldbrand) wird auf die Bedeutung der Fernerkundung für spezielle Aufgabengebiete der Fernerkundung hingewie sen. Anhand dieser Aufträge kann ein Teil der Fernerkundungsgrundlagen erarbeitet werden, wie beispielsweise die Thematik der Thermalbilder, Spektraleigenschaften von Objekten, die Herstellung von Bildprodukten oder die Variationsbreite verschiedener Satelliten.

Wichtig am vorgestellten Zugang ist, dass er sich von einer wissenschaftlichen Arbeitsform grundlegend unterscheidet. Die Schüler-/innen tun mit den Bilder n nicht das, was Wissenschaftler oder andere Nutzer tun, sondern sie bearbe iten Aufgabenstellungen, die dem Bildungsauftrag allgemein bildender Schulen und dem Wissensstand der Jugendlichen entsprechen. Gleichermassen wird in diesem Sinn Wissenschaftspropädeu tik betrieben und die Schüler-/innen werden auf eine geographische Disziplin aufmerksam, die ihnen bislang eher unbekannt war.

## 4 Hintergründe zur vorgestellten Zugangsweise

Durch die oben dargelegten Arbeitsformen m it Luft- und Satellitenbilder n werden die Schüler-/innen auf Anwendungsgebiete der Fernerkundung au fmerksam. Insofern kann durchaus von einer Integration der Fernerkundung in den Geographieunterricht gesp rochen werden, auch wenn "nur" Bildmaterialien verwendet und Spektr um, Satellitensysteme oder Bildbearbeitungsmöglichkeiten kaum thematisiert werden. Es ist für die Schule unerlässlich, die bisherigen Wege des Wissenstransfers zu überdenken und neu zu gestalte n. Wie bereits erwähnt, reicht in einer Allgemeinausbildung dieser Zugang zur Fernerkundung aus. Mit der Faszination, der Neugier und der Begegnung mit interessanten Bildprodukten wird eine Voraussetzung für die spätere Beschäftigung mit Fernerkundung gelegt, die bedeutsa mer als spezifische Fachkenntnisse sind. Zudem hat die Praxiserprobung der Aufgabenstell ungen gezeigt, dass unweigerlich Fragen im Grundlagenbereich der Fernerkundung auftauchen, die – bei Bedarf, Kenntnis der Lehrperson, Zeitbudget und Interesse – vertieft werden können und sollen.

Wesentlich ist hingegen, dass di e Schüler-/innen mit der Arbeit an den Luft- und Satellitenbildern weitere Kompetenzen erwer ben, die für de n heutigen Geographieunterricht wichtig sind. Sie sollen nachfolgend kurz vorgestellt werden.

### 4.1 Medien- und Methodenkompetenz

Lernpsychologische Erkenntnisse, gesellschaftliche Veränderungen und Anforderungen der Berufswelt an zukünftige Lehrlinge erfordern, dass bereits Schüler-/innen lernen, sich Informationen zu beschaffen und zu verarbeiten. Zunehme nd mehr wird selbständi ges Arbeiten verlangt und der Austausch in Gruppen, Meinungsbildungs prozesse und genaues präzises Ausführen von Aufträgen gehören zu selbstverständlichen Beru fskompetenzen. Die Aufträge mit den Luft- und Satellitenbildern fördern diese Fähigkeiten. Zusätz lich dazu lernen die Schüler-/innen, eine Medien gegenüber kritische Haltung einzunehmen, in dem sie Bilder deuten, hinterfragen und in Bezug setzen zu eigenen Erkenntnissen (und Informationen aus anderen Medien). Sie setzen sich verstärkter als bisher mit einem Medium kritisch auseinander und werden fähig, diese Fähigkeit auf andere Medien zu übertragen.

### 4.2 Raumorientierung

Egal, ob es sich u m gross- oder kleinmassstäbliche Bilder handelt, sie zeigen immer in vielfältigster Weise Objekte auf der Erdoberfläche. Al s Einzelmerkmale können sie identifiziert werden, im Überblick vermitteln sie Eindrücke un d Sichtweisen der Welt oder Ausschnitten davon. Die Abbildungen weisen neben dem Bildinhalt (Was wird dargestellt?) immer auch einen Raumbezug auf (Wo befinden wir uns?) und weil mit der Bildbetrachtung auch ein Perspektivenwechsel verbunden ist, leisten sie einen Beitrag zu m Aufbau der räumlichen Kompetenz. Luft- und Satellitenbilder ermöglichen die Erfassung, Beschreibung, Erklärung und Lokalisierung räumlicher Strukturen, Vorgänge und raumwirksamer Handlungen und tragen dadurch zu einem umfassenden Verständnis geographischer Anliegen bei.

### 4.3 Visuelle Kompetenz

Anhand von Luft- und Satellitenbild ern kann das visuelle Lernen gefördert und vorangetrieben werden – eine wichtige Kompetenz in einem st ark visuell geprägten Zeitalter. Das bisher noch weitgehend ungenutzte Potenzial der emotionalen Wirkung von Bildern und ihr Einbezug in den Wissenserwerb lassen den Schluss zu, dass sich Lernprozesse auch durch die Arbeit mit Luftund Satellitenbildern nachhaltig verbessern werden . Ein kompetenter Umgang mit Bildmaterialien bedeutet einerseits, Informationen aus Bilder n zu entnehmen und sie zu verwerten, andererseits können Bilder im Hinblick auf ihre Wir kung beurteilt und eingeordnet werden. Diese Fähigkeiten können aber nur dann aufgebaut und erworben werden, wenn Schüler-/innen häufig und regelmässig mit Bildern arbeiten müssen – die losgelöste Veranschaulichung von Sachverhalten durch Bilder reicht dafür nicht aus.

# 5 Ausblick

Mit Aufgabenstellungen für Schüler-/innen a llein ist die Integration der Fernerkundung noch nicht vollzogen. Wie Abb. 3 zeigt, sind dafür weitere Anstrengungen nötig:

- Anliegen der Fernerkundung müssen in Lehrplänen verbindlich verankert werden. Besonders die Arbeit mit Luft- und Satellitenbilder sollte zum Bestandteil geographischer Zielvereinbarungen werden, erst so wird diese Disziplin auch in Schulbüchern nachhaltig integriert.
- Die Akzeptanz und das Interesse für die Fern erkundung muss bei Lehrpersonen verbessert werden. Weiterbildungskurse oder Ausbildungsei nheiten mit "lehrerfreundlichen" Zugangsweisen und Konzepten sind dafür unerlässlich.

- Am Wissenschaftstransfer von der Universität zur Schule muss weiterhin gearbeitet werden. Die blosse Vereinfachung von Sachverhalten reic ht nicht aus, die Lernvoraussetzungen und die Alltagswelt der Jugendlichen muss besser einbezogen werden. Die Schaffung von kindgerechten Lernumgebungen wäre ein Schritt in diese Richtung.
- Institutionen aus der Wirtschaft können dazu be itragen, dass die Anliegen der Berufswelt besser in der Schule aufgegriffen und in entsprechenden Kooperationen umgesetzt werden.

Es hat sich gezeigt, dass das vorgestellte Konzept ein Schritt in die richtige Richtung und dennoch erst ein Anfang ist.



Abb. 3: Konzept zur Integration der Fernerkundung in die Schule

## 6 Literaturverzeichnis

- HASSENPFLUG, W., 1998: Was kann Fernerkundung für Schule und Bildung leisten? In: Tagungsband: 14. Nutzerseminar des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums der DLR 1997, Hrsg. S.W. Decht, W. Mett, Oberpfaffenhofen. S. 49-59
- NEUMANN-MAYER, U.,2005: Der Zugang zu Satellitenbildern in der Orientierungsstufe Probleme und Möglichkeiten. Dissertation an der Universität Kiel, unter http://e-diss.unikiel.de/diss\_1657/ (10.4.2006)
- REUSCHENBACH, M., 2997 (in press): Entwicklung und Realisierung eines Konzeptes zur verstärkten Integration der Fernerkundung, insbesondere von Luft –und Satellitenbildern, in den Geographieunterricht. Dissertation am Geographischen Institut der Universität Zürich

# Integration von Fernerkundung im Schulunterricht

### VOB, KERSTIN<sup>1</sup>, GOETZKE, ROLAND<sup>1</sup> & FLORIAN THIERFELDT<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Die Studie beschäftigt sich mit der Integration von Fernerkundung an Gymnasien. Für – und zusammen mit kooperierenden Schulen, wird ein interdisziplinäres, didaktisches Konzept entwickelt, um das Thema der Fernerkundung in bestehende Lerninhalte der einzelnen Jahrgangsstufen zu integrieren. Ein wesentliches Grundprinzip des Konzeptes ist es, die Fernerkundung fächerübergreifend zu behandeln. Hierbei sollen die theoretischen und physikalischen Grundlagen in den Fächern Mathematik, Informatik und Physik behandelt werden. Diese stellen die Grundlage für eine anwendungsbezogene Integration des Themas im Geographie- und Biologieunterricht dar. Der Vorteil des fächerübergreifenden Unterrichts wird darin gesehen, dass durch die gezielte Vernetzung der Unterrichtsinhalte das Gelernte bei den Schülern nachhaltig verankert werden kann. Infolgedessen eigen sich die Schüler nich nur isoliertes Detailwissen an, sondern reflektieren die verschiedenen Inhalte in konkreten Wechselwirkungen.

Insbesondere ist die Konzeption der Unterrichtseinheiten darauf ausgerichtet, das Thema "Fernerkundung" nachhaltig, d.h. über die Projektlaufzeit hinaus, in den Unterricht zu integrieren. Diese Nachhaltigkeit kann dann erreicht werden, wenn im Curriculum verankerte Themenfeldern mit Hilfe der Fernerkundung bearbeitet werden. Hieraus entsteht ein zusätzlicher Mehrwert in Form einer Erhöhung des Lernspektrums, da neben den im Lehrplan vorgesehenen Inhalten auch inhaltliche und methodische Aspekte der Fernerkundung vermittelt werden.

### 1 Einleitung

Satellitengestützte Fernerkundung ist eine europaweit schnell wachsende Technologie mit einem wachsenden Bedarf an qualifizierten Arbeitskräften. Während der alltägliche Einsatz von Satelliten zur Wetterbeobachtung und Wettervorhersage in der Öffentlichkeit durch die Medien bekannt ist, wird die zunehmende Bedeutung räumlich hochauflösender Satelliten kaum wahrgenommen, obwohl sich in der Darstellung und Abbildung der Erdoberfläche mithilfe von Fernerkundungssensoren in den letzten Jahren zahlreiche innovative Entwicklungen und neue Anwendungsfelder ergeben haben. Als eine Ursache wird die geringe Behandlung des Themas "Fernerkundung" im Schulunterricht der Sekundarstufe I und II angesehen.

Die Möglichkeiten der Satellitenfernerkundung werden derzeit an Schulen, wenn überhaupt, nur sehr rudimentär behandelt. Gegensätzlich werden Satellitenbilder verstärkt bei der Lösung von aktuellen Problemstellungen im Umweltmanagement eingesetzt. Aus diesem Grund wird die Beschäftigung mit den Themen Geographische Informationssysteme und Fernerkundung innerhalb der Schule immer häufiger gefordert. Beispielsweise hat die Deutsche Gesellschaft für Geographie (DGFG) in den 2006 neu erstellten Bildungsstandards für das Fach Geographie die Bedeutung des Einsatzes von Fernerkundungsmethoden und geographischen Informationssystemen hervorgehoben. Die DGFG betont, dass der Einsatz neuer Informationstechnologien innerhalb der Schulbildung in zweifacher Hinsicht einen Beitrag leisten kann:

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Geographisches Institut, Universität Bonn, Meckenheimer Allee 166, 53115 Bonn

- 1. Die Bereitstellung von Informationen, die in den Standard-Lehrmaterialien aus Gründen der Aktualität, Kosten sowie des verfügbaren Raumes nicht enthalten sind.
- 2. Die Unterstützung neuer Lehr-, Lern- und Unterrichtsformen, wodurch auf der einen Seite der traditionelle Unterricht bereichert und geöffnet werden kann und andererseits neue Themen und Unterrichtsformen zum Tragen kommen können.

Der Vorteil der Fernerkundung gegenüber dem Einsatz von traditionellen Medien besteht neben einer besseren Anschaulichkeit und Aktualität auch in der Förderung der von fachmethodischen Kompetenzen, d. h. durch die eigenständige Analyse und Auswertung der Fernerkundungsdaten können Schüler ihre methodische Kompetenz durch die eigenständige Umsetzung entwickeln.

## 2 Unterrichtskonzept

Über die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Gymnasien im Raum Bonn / Köln und dem Geographischen Institut der Universität Bonn wird das Thema "*Fernerkundung im Schulunter-richt (FIS)*" bearbeitet. Das übergeordnete Ziel besteht darin, über einen engen Austausch und eine intensive Zusammenarbeit der beteiligten Partner, Schülern der Sekundarstufe I und II die Grundlagen der optischen und radargestützten Fernerkundung sowie die Auswertung dieser Daten in Hinblick auf inhaltliche Fragestellungen zu vermitteln. Die effektive Umsetzung dieser Ziele ist an die Entwicklung eines neuen, nachhaltigen und fächerübergreifenden Unterrichtskonzeptes gebunden.

### 2.1 Fächerübergreifender Unterricht

Zur Verbesserung des Unterrichts hat die Kultusministerkonferenz (KMK) bereits 1997 die Einführung von fächerübergreifenden Arbeits- und Lernformen gefordert. Ziel ist es das bereichsübergreifende Denken der Schüler zu fördern. Dementsprechend wird die Idee der fächerübergreifenden Vermittlung von Lerninhalten in Deutschland mittlerweile in allen Vortexten neuer Lehrplänen verbindlich gefordert (KIRCHBERG, 2005; RINGEL, 2005). Nach WILHELMI (2006) leistet fächerübergreifender Unterricht konkret, dass von einem Schwerpunktfach ausgehend "weitere Fächer inhaltliche Spezialaspekte und Arbeitsmethoden hinzusteuern, um so hohe Synergieeffekte zu erzielen."

Entgegen der häufigen Meinung das Thema Fernerkundung sei zu komplex für den Schulunterricht, baut die Leitidee des Unterrichtskonzeptes gerade auf dieser Komplexität auf: Die Umsetzung und Integration des Themas erfolgt auf der Basis von neuen, fächerübergreifenden und vernetzten Lernmodulen. Die Vernetzung der Module basiert darauf, dass die theoretischen und physikalischen Grundlagen in den Fächern Mathematik, Informatik und Physik behandelt werden. Entsprechend wird in diesen drei Grundlagenfächern die theoretische Basis für eine anwendungsbezogene Integration des Themas "Fernerkundung" im Geographie- und Biologieunterricht geschaffen.



Abbildung 1: Fächerübergreifende Integration der Fernerkundung in den Schulunterricht

Der Vorteil des modularen Ansatzes wird in der freien Kombinierbarkeit der einzelnen Module gesehen. Entsprechend wird eine speziell auf Zusammenhänge ausgerichtet Unterrichtsstruktur entwickelt, bei der die komplexe Thematik der Satellitenfernerkundung in Form von kleineren Modulen in den unterschiedlichen Fächern behandelt wird. In der Tabelle 1 wird am Beispiel des Themas "*Erfassung von Desertifikation in Afrika aus Satellitendaten*" aufgezeigt, wie sich die einzelnen Module in den beteiligten Fächern aufteilen.

Fach	Physik	Informatik	Mathematik	Geographie
Inhalt	Elektro-magnetische Strahlung Sensoren Bilddarstellung und Bildverbesserung	Datenimport Datenexport	Statistische Auswer- tung	Erfassung der Verände- rung der Landbede- ckungen aus Satelliten- daten Interpretation der aus den Satellitendaten gewonnen Erkenntnisse Erstellung von thema- tischen Ergebniskarten

Tab. 1: Aufteilung der Module zum Thema "Erfassung von Desertifikation in Afrika aus Satellitendaten"

Der Vorteil des fächerübergreifenden Unterrichts wird darin gesehen, dass durch die gezielte Vernetzung der Unterrichtsinhalte das Gelernte bei den Schülern nachhaltig verankert wird. Infolgedessen eignen sich die Schüler nicht nur isoliertes Detailwissen an, sondern reflektieren die verschiedenen Inhalte in konkreten Wechselwirkungen.

### 2.2 Inhaltliche Unterrichtsthemen

Ein weiteres zentrales Projektziel beschäftigt sich mit der nachhaltigen, d. h. langfristig Integration des Themas "Fernerkundung" in den Unterricht. In einigen Pilotprojekten wurde in Deutschland Fernerkundung bereits an Schulen eingesetzt und die Reaktion der Schüler auf dieses neue Medium untersucht. BACHMANN (1995) beschreibt in seinem bereits 1992 an vier Schulen

durchgeführten Projekt, dass die Satellitenbildanalyse "*ihr Potential als wertvolle Technik sowohl für einen sinnvollen Computereinsatz als auch für einen fächerübergreifenden, interessanten Unterricht deutlich unter Beweis gestellt" hat. Gleichzeitig zeigt er aber auch weiteren Handlungsbedarf auf. Dieser bezieht sich auf die Entwicklung von stärker lehrplanbezogenen Anwendungsbeispielen. Damit fernerkundliche Lehrthemen nachhaltig und auf Dauer in den Unterricht integriert werden, müssen diese mit Themen des Curriculums vernetzt werden. Entsprechend werden in Abstimmung mit den bestehenden Lehrplänen inhaltliche Unterrichtsthemen ausgewählt, deren Problemstellung mit Hilfe von Fernerkundungsdaten bearbeitet werden können. In Tabelle 2 sind exemplarisch mögliche Themen- und Problemfelder aus dem Erdkundeunterricht aufgezeigt:* 

Thema wie im Lehrplan vorgesehen	Jahrgangsstufe
Vom Luftbild zur Karte	5
Lokales Schulumfeld (Siedlungen, Flächennutzung)	5
Landwirtschaft	5,9
Großlandschaften in Deutschland	5
Braunkohletagebau	5
Flächeninanspruchnahme durch Tourismus	7
Naturkatastrophen	7
Vernichtung des tropischen Regenwaldes	7
Desertifikation	7,8,11
Bevölkerungsentwicklung	8
Klimawandel	11
Raumplanung / Städtewachstum	9, 12
	5-13

Tab. 2 Inhaltliche Lehrthemen aus dem Curriculum Erdkunde, die eine Verknüpfung mit dem Thema "Fernerkundung" erlauben

Über die Verknüpfung von "klassischen" Unterrichtsthemen und der Fernerkundung entsteht ein zusätzlicher Mehrwert in Form einer Erhöhung des Lernspektrums, da neben den im Lehrplan vorgesehenen Inhalten auch inhaltliche und methodische Aspekte der Fernerkundung vermittelt werden.

### 2.3 Methodische Unterrichtsthemen

Die Vermittlung von Medienkompetenzen wird innerhalb der Schulausbildung mehr und mehr als eine wesentliche Bildungsaufgabe verstanden. Zusätzlich wird eine Ausbildung im Umgang mit den so genannten "*Neuen Medien"* gefordert (PÜTZ & REUBER 2001, KAPPAS 2001). Diese Ausbildung umfasst sowohl die Fähigkeit mit Neuen Medien umzugehen als auch die kritische Auseinandersetzung mit Neuen Medien.

Bereits Ende der 70er / Anfang der 80er Jahre gab es erste Ideen, Satellitenbilder im Geographieunterricht als zusätzliches Medium einzusetzen (BRUCKER, 1981; FRÖMEL, 1981; HAVER-SATH, 1981; KÖHLER, 1986; THEISSEN, 1986). Eine direkte Bearbeitung der Fernerkundungsbilder durch die Schüler konnte aufgrund fehlender Computerkapazitäten häufig nicht umgesetzt werden. Infolgedessen wurden Satellitenbilder ähnlich wie Luftbilder nur als Anschauungsobjekte im Unterricht benutzt. Aus diesem Grund machten sich HASSENPFLUG (1996a-c) und BREIT-

BACH (1996) Mitte der 90er Jahre für eine verstärkte Anwendung von Fernerkundung und Satellitenbildern im Geographieunterricht stark. Sie wiesen zudem auf die Diskrepanz zwischen den Möglichkeiten, die Fernerkundungsdaten als primäre Informationsquelle bieten und der Nutzung derselben im Erdkundeunterricht hin. Trotz einer stetigen Verbesserung der Computerausstattung der Schulen sowie der Etablierung von Geographischen Informationssystemen (GIS) erhalten nach HASSENPFLUG (1996 C) Schüler nach wie vor hauptsächlich vorgefertigtes Kartenmaterial als Abbild der Realität. Dieses Kartenmaterial hat den Nachteil, dass es stark abstrahiert und daher nicht leicht verständlich ist. HASSENPFLUG (1996 c) kritisiert zudem, dass das genutzte Kartenmaterial häufig manipuliert und pädagogisch elementarisiert sei.

Da digitale Satellitenbilder vor allem auf Grund ihrer Dynamik im Gegensatz zu statischem Kartenmaterial als zusätzliches Medium gewinnbringend im alltäglichen Unterrichtsgeschehen eingebracht werden können (BREITBACH, 1996), wird neben den inhaltlichen Zielen ein methodischinstrumentelles Ziel verfolgt. Entsprechend sollen den Schülern die Methoden der digitalen Bildverarbeitung und Interpretation von Fernerkundungsdaten aller räumlichen Skalenebenen (QuickBird bis Modis) problemorientiert vermitteln werden. Ebenfalls soll über die Analyse der Fernerkundungsdaten das Denken in räumlichen Strukturen und Prozessen gefördert werden. Eine besondere Schlüsselrolle kommt hierbei der Nutzung einer skalierbaren Bildverarbeitungssoftware zur Visualisierung, Prozessierung, Analyse und Ergebnispräsentation zu. Das Ziel ist es den Schülern die Satellitenfernerkundung u.a. als eine Messtechnik zu veranschaulichen. Entsprechend soll den Schülern durch die praktische Auswertung der Bilder bewusst werden, dass Fernerkundungsdaten "mehr als farbige Bilder" sind, die die Möglichkeit bieten vielfältige aktuelle Fragstellungen und Problemstellungen zu beantworten. Infolgedessen werden die Methoden aus dem Bereich der Digitalen Bildverarbeitung als Werkzeuge zur Beantwortung und zur Lösung von Problemkomplexen mit räumlichem Bezug verstanden (vgl. auch SCHÄFER, 2004). Gleichzeitig wird durch die praktischen Arbeiten und das damit verbundene Experimentieren, Ergründen und Analysieren aktuelle Themenkomplexe der Informationsverarbeitung behandelt, so dass insgesamt der allgemeine Umgang mit EDV verbessert wird.

### 2.4 Lehrerfortbildungen

Aufgrund der Komplexität des Themas "Fernerkundung" ergibt sich auch für die Lehrer eine intensive Einarbeitung, die ohne "Hilfestellung von Außen" häufig als ein zu großes Hindernis gesehen wird. Um das Thema "Satellitenfernerkundung" lehrplangerecht und fächerübergreifend in der Schule einsetzen zu können benötigen auch die Lehrer qualifizierte methodische Kenntnisse. Aus diesem Grund wird ein didaktisches K onzept zur Lehrefortbildungen ausgearbeitet, welches sowohl die Ausarbeitung von Materialien für die Lehrerfortbildungen sowie die Durchführung der Fortbildungen und Workshops umfasst. Das Ziel ist es, den Lehrern den Einstieg in das Thema "Fernerkundung" zu erleichtern und somit die Voraussetzung für den Einsatz im Schulunterricht sicher zu stellen. Insbesondere müssen die Lehrer wissen, wie die verschiedenen Module aufeinander aufbauen und ineinander grei fen, wie die digitalen Fernerkundungsdaten ausgewertet werden können und wie die Software im Unterricht eingesetzt werden kann. Insgesamt werden die Fortbildungen anhand vielfältiger unt errichtspraktischer Beispiele und durch den Einsatz digitaler Medien und spezieller Software zur Auswertung der Satellitendaten die Medienkompetenz der Lehrer erweitern. Neben dem Erlernen neuer Fähigkeiten im Umgang mit Satellitenfernerkundung soll anhand von Beispiel en gezeigt werden, wie digitale Medien den Unterricht um neue Aspekte und Möglichkeiten bereichern können.

### 3 Umsetzung

Das Unterrichtskonzept setzt sich für die jewei ligen Lerneinheiten aus zwei Teilbereichen zusammen. In einem ersten Teil werden digitale Unterrichtsmaterialien zu einem spezi ellen Themenkomplex bzw. Themenmodul erstellt. Der Aufbau sieht vor, dass sich die Schüler zunächst am Rechner über eine Fragestellung informieren. Nachdem diese mit der entsprechenden Hintergrundinformation vorgestellt wird, erfolgt die Verknüpfung der inhaltlichen Problemstellung mit der Fernerkundung. Entsprechend wird den Schülern vermittelt, wie sie die Fernerkundung problemorientiert einsetzen können. Neben den für die spezifische Fragestellung notwendigen Grundlagen der Fernerkundung werden auch verschiede ne fernerkundliche Methoden behandelt. Der zweite Teil des Unterrichtskonzeptes st ellt einen so genannten "Methodenkoffer" dar. Dieser "Methodenkoffer" enthält zu den unterschiedlic hsten Grundlagen der Fernerkundung Informationskarten. Diese können die Schüler immer dann al s zusätzliche Informationsquelle nutzen, wenn Fragen oder Unklarheiten in den Lerneinh eiten auftauchen. Folglich wird über den "Methodenkoffer" das individuelle Lern en der Schüler unterstützt und gefördert. Da die Schüler Informationen unterschiedlich aufnehmen und nach i ndividuellen Regeln verarbeiten, wird der Lernerfolg dadurch gesteigert, dass die Inform ationskarten der einzelnen Themenkomplexe in unterschiedliche Schwierigkeits- und Informa tionsgrade eingeteilt werden. Somit könne n sich die Schüler auf der Grundlage ihres individue llen Lerntempos. Lernstils und vorhandenem Vorwissen informieren. Tabelle 3 zeigt einen Ausschnitt des Themenspektrums des Methodenkoffers:

Grundlagen	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
Fernerkundung		1		
Reflexion	Was ist Reflexion?	Was ist das elektro- magnetische Spekt- rum?	Warum ist der Apfel rot?	Bildvergleich sichtba- rer Bereich / nicht sichtbarer Bereich
Farbmischung / Farbkombination	Was passiert beim Mischen der sichtba- ren Kanäle? (Was / Warum)	Was passiert wenn ein nicht sichtbarer Kanal einbezogen wird? (Was / Warum)	Spektrum Sichtbar / Nicht Sicht- bar	Rechnen mit Kanälen (z.B. NDVI)
Sensoren / Aufnah- meprinzipien	Unterschied Umlau- fende und geostatio- näre Satelliten	Welche Aufnahme- prinzipien gibt es?	Was kann ein Sensor aufnehmen?	Unterschied passive und aktive Systeme
Auflösung	Was umfasst der Begriff Auflösung?	Was ist räumliche Auflösung?	Was ist ein Mischpi- xel?	Was ist zeitliche Auflösung?
			Kann die räumliche Auflösung auch zu gut sein?	Was ist spektrale Auflösung?

Tab. 2: Struktur Methodenkoffer

Das gesamte Unterrichtskonzept unterscheidet si ch im Gegensatz zu lehrerzentrierten Unterrichtsformen dadurch, dass die Schüler aktiver am Unterricht beteiligt werden. Hieraus ergibt sich eine erhöhte Motivation und ein nachhaltiger Lernerfolg. Ebenfalls stellt diese individuelle Form des Lernens ei ne Vorbereitung auf ein lebenslanges Lernen sowie die Förderung der Teamfähigkeit dar. Durch die aktive Einbindung der Schüler in den Unterricht ändert sich entsprechend die Rolle des Lehrers hin zu einem Le rncoach, der innerhalb des Lernprozesses als Begleiter, Anleiter, Beobachter und Helfer fungiert.

Zur Bearbeitung der einzelnen Unterrichtsreihen erhalten die Schüler so genannte "Laufzettel". Mit diesen Laufzetteln werden die Schüler über Aufgabenstellungen sowie Hinweise, in welcher Reihenfolge die Unterrichtsmaterialien sinnvoll zu nutzen sind, durch die jeweiligen Lerneinheiten geführt.

Über die Kombination von analogen und digitale n Informationen (Blended Learning) soll das wesentliche Projektziel, die Förderung der Methoden- und Medienkompetenz der Schüler, erreicht werden.

## 4 Unterrichtsbeispiel – Überprüfung von Oasenmodellen mit Hilfe der Fernerkundung

Ein klassisches Unterrichtsthema im Erdkundeunt erricht der Jahrgangsstufe 7 stellen die Trockenräume der Erde dar. In diesem Zusamme nhang werden die verschiedenen Oasentypen anhand von einfachen Modellen besprochen. Im didak tischen Zentrum des Unterrichtsmoduls steht neben dem kennen lernen und erfassen der Unterschiede der Grob-Struktur der einzelnen Oasentypen, die kritische Überprüfung der Modelle mit der Wirklichkeit. Die Überprüfung der Oasenmodelle erfolgt auf der Grundlage von Fernerkundungsdaten.

Entsprechend des beschriebene Unterrichtkonzepts ist die Unterrichtseinheit in Form einer rechnergestützte Lernumgebung angelegt, die bei ents tehenden Fragen durch den "Methodenkoffer" ergänzt werden kann. Die Lernumgebung setzt sich aus den Unterpunkten "Definition", "Oasentypen" und "Fernerkundungslabor" zusammen. In den ersten beiden Teilbereichen können die Schüler zunächst umfassend über die Oasen informieren. Entsprechend finden sich hinter einem ersten Button Informationen zur allgemeinen Defi nition von Oasen. Darauf aufbauend erfahren die Schüler in einem zweiten Unterpunkt welche verschiedenen Oasenmodelle es gibt und wo die Unterschiede liegen.



Abbildung 2: Lernmodul zum Thema Oasen - Einstiegsseite (links) sowie Oasentypen (rechts)

Zur Beantwortung der zentralen Fragestellung, ob das Modell der Flusso asen mit der Wirklichkeit übereinstimmt, sollen die Schüler die Fernerkundung nutzen. Entsprechend müssen die Schüler, nachdem sie sich über die Oasenmodelle informiert haben, ins "Fernerkundungslabor" wechseln. Im "Fernerkundungslabor" ist ein Landsat Bild, welches den Nil abbildet, integriert. Zunächst bietet das Modul den Schülern die Möglichkeit sich mit Satellitenbildern vertraut zu machen und sich sozusagen in das Bild "einzusehen". Hierzu ist im Unterpunkt "Bildvergleich" eine Darstellung in Echt- und eine Darstellung in Falschfarben implementiert. Zusätzlich liegt hinter dem Falschfarbenbild ein Datensatz mit räumlich hochaufgelösten Google Earth<sup>®</sup> Bildern. Diese können über ein Informationstool sichtbar gemacht werden und sollen das Erkennen verschiedener Landoberflächen erleichtern. Auf einer deskriptiven Ebene können die Schüler zunächst die beiden Bilder miteinander vergleic hen und lernen, dass über unterschiedliche Kanalkombinationen verschiedene Oberflächenstrukturen unterschiedlich gut sichtbar sind. Dies wird durch die Kombination mit einem zweiten Tool, dem "Bildmischer", zusätzlich unterstütz, da die Schüler hier selbstständig Kanalkombinationen ve rändern können. Das Ziel besteht darin, die Kanalkombination auszuwählen, mit der die Strukt uren der Flussoase am besten zu erkennen sind. Neben den anwendungsbezogenen Tools besteht über den dritten Unterpunkt "Kanalmixer" die Möglichkeit einige physikalische Grundlagen und Prinzipien der Fernerkundung zu lernen, beispielsweise geht das Tool auf die Zusammen setzung des elektromagnetischen Spektrums ein. Ebenfalls wird erklärt, welche Möglichkeiten und Vorteile der Einsatz des Infrarotenbereichs hat.

Darüber hinaus ist die Auseinandersetzung mit dem Bildinhalt an eine Aufgabe gekoppelt, in der die Schüler die einzelnen Obje kte der Landbedeckung benennen sollen. Zu diesem Zweck sind die einzelnen Landbedeckungen unter den Bildern in einer Leiste benannt. Die Schüler können diese Begriffe mit der Maus auf das Bild ziehen und somit die Begriffe den Landberflächen zuordnen. Ist die Zuordnung richtig, werden alle Bereiche dieser Landberflächenklasse in der entsprechenden Farbe des Begriffs eingefärbt. Über diese spielerische Herangehensweise sollen 3 wesentliche Lernziele erreicht werden:

- 1. Deuten der Darstellung in Satellitenbild er und dadurch die Förderung der "Lesekompetenz" von Bildern
- 2. Veranschaulichung des Prinzips der Klassifikation
- 3. Erstellung von Karten aus Satellitenbildern

Die erstellte Karte dient abschließend zum kritischen Vergleich mit dem Modell der Flussoase.



Abbildung 3: Lernmodul zum Thema Oasenmodelle - Bildvergleich und Bildklassifikation

# 5 Ausblick

Das entwickelte Unterrichtskonzept zeigt, dass über die Implementierung des Themas "Fernerkundung" im Schulunterricht fünf wesentliche Aspekte aus der aktuellen Diskussion zur Verbesserung der Schulbildung umgesetzt werden können:

- 1. Aufgrund der Komplexität des Themas "Fer nerkundung" fordert dieses Thema geradezu einen fächerübergreifenden Unterricht. Durch die gezielte Vernetzung der Unterrichtsinhalte wird das Gelernte bei den Schülern nac hhaltig verankert, so da ss sich die Schüler nicht nur isoliertes Detailwissen aneignen, sondern die verschiedenen Inhalte in konkreten Wechselwirkungen reflektieren.
- 2. Über die Verknüpfung des Themas mit im Curriculum bestehenden Unterrichtsthemen kann das Thema "Fernerkundung" nachhaltig im Unterricht integriert werden. Hierüber wird nicht nur die Motivation bei der Bear beitung klassischer Unterrichtsinhalte erhöht. Ebenfalls erfolgt eine Erhöhung des Lernspek trums, da neben den im Lehrplan vorgesehenen Inhalten auch inhaltliche und methodi sche Aspekte der Fernerkundung vermittelt werden.
- Die eigenständige Auswertung der digitalen Satellitenbilder sowie die erstellten rechnergestützten Lernmodule fördern den Umgang mit Neuen Medien und stärken somit die Methodenkompetenz der Schüler.
- Das individuelle Lernen in Bezug auf ei n unterschiedliches Lerntempo und einen unterschiedlichen Lernstil wird durch die Umsetz ung des skalierten Methodenkoffers implementiert.
- 5. Die nachhaltige Integration des Themas "Fernerkundung" erfordert eine stetige Weiterbildung der Lehrer in diesem Themenfeld.

## 6 Danksagung

Das Projekt "Fernerkundung in Schulen" (FIS), zu dem die vorliegende Arbeit zuzuordnen ist, wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie durch das Deutsche

Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) unter dem Föderkennzeichen 50EE0615 gefördert. Den Projektpartnern aus den verschiedenen Schulen gilt ein herzlicher Dank für die konstruktive Diskussion und die Umsetzung des entwickelten Konzeptes im Unterricht.

### 7 Literaturverzeichnis

- BACHMANN, M., 1995: Fernerkundung in der Schule. Ein Erfahrungsbericht von Unterrichtsversuchen. Praxis Geographie, 25 (3): 20-21.
- BREITBACH, T., 1996: Stellenwert und Handhabung der Fernerkundung im Geographieunterricht. Geographie und Schule, **104**: 26-39.
- BRUCKER, A., 1981: Sehgewohnheiten ändern. Satellitenbilder als Medien im Geographieunterricht. Praxis Geographie **11** (1): 2-3.
- DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOGRAPHIE (DGFG) (2002), Grundsätze und Empfehlungen für die Lehrplanarbeit im Schulfach Geographie. Arbeitsgruppe Curriculum 2000+ der Deutschen Gesellschaft für Geographie (DGfG). Web: http://www.ku-eichstaett.de/hp/curriculum2000.doc (31.01.2007)
- FRÖMEL, W., 1981: Die Reaktion von Schülern auf Satellitenbilder. Praxis Geographie 11.(1): 15-17.
- HASSENPFLUG, W., 1996 a: Satellitenbilder im Erdkundeunterricht. Geographie heute, 137: 4-11.
- HASSENPFLUG, W., 1996 b: Fernerkundung als geowissenschaftliche Informationsquelle. Geographie und Schule, 100: 38-42.
- HASSENPFLUG, W., 1996 c: Fernerkundung und Satellitenbilder Methoden und geographisch bedeutsame Potentiale. Geographie und Schule, **104**: 3-10.
- HAVERSATH, B., 1981: Kurzbericht über die Arbeit mit Satellitenbildern in der Kollegstufe. Praxis Geographie **11** (1): 33.
- KAPPAS, M., 2001: Geographische Informationssysteme. Das Geographische Seminar. Braunschweig.
- KIRCHBERG, G., 2005: Die Geographielehrpläne in Deutschland heute. Bestandsaufnahme und Ausblick . Geographie und Schule, **156**: 2-9.
- KÖHLER, E., 1986: Das Satellitenbild. Brucker, A. (Hrsg.): Medien im Geographieunterricht. Düsseldorf: 62-70.
- PÜTZ, R. & REUBNER, P., 2001: Das Internet im Erdkundeunterricht. Geographie heute, **195:** 5-10.
- RINGEL, G., 2005: Nationale Bildungsstandards f
  ür den Geographieunterricht. M
  öglichkeiten und Grenzen. Geographie und Schule, 156: 23-32.
- SCHÄFER, D., 2004: Geographische Informationssysteme (GIS). Behnen, T. S. Czerwoniak, D. Falk, W. Fraedric, M. Lamberty, R. Pütz und D. Schäfer (Hrsg.): Industrieländer im Wandel: 44-45.
- THEISSEN, U., 1986: Das Satellitenbild. Köck, H. (Hrsg.): Grundlagen des Geographieunterrichts. Handbuch des Geographieunterrichts, 1: 268-270.
- WILHELMI, V., 2006: Nachhaltigkeit und Umwelterziehung. Leitbilder des Geographieunterrichts. Praxis Geographie, 36 (2): 4-8.

# Erfahrungen beim Austausch von e-Learning-Kursen auf europäischer Ebene

#### WOLFGANG REINHARDT & STEPHAN MÄS<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Dieser Erfahrungsbericht demonstriert, wie ein sehr einfaches, nicht kommerzielles "Business-Modell" zum Austausch von qualitativ hochwertigen e-Learning Kursen zwischen europäischen Hochschulen in der Praxis funktionieren kann. Im vorgestellten eduGl Projekt wurden hierfür vorhandene e-Learning Kurse in einem Netzwerk aus acht europäischen GI Instituten untereinander ausgetauscht. Dabei bot jedes der Institute einen Kurs für die Studenten zweier Partneruniversitäten an und erhielt im Gegenzug von den Partnern zwei Kurse für die eigenen Studenten. Dieses Papier erläutert die Vorgehensweise im Projekt und geht auf die gesammelten Erfahrungen ein.

### 1 Einleitung

e-Learning ist zu einem wichtigen Instrumentarium in der Aus- und Weiterbildung auf unterschiedlichsten Bildungsebenen geworden. Ein guter Überblick zu dem Thema findet sich z.B. auf dem deutschen Bildungsserver von Bund und Ländern [http://www.bildungsserver.de/start.html]. In der universitären Ausbildung werden e-Learning-Module in der Regel zur Ergänzung der Präsenzvorlesung eingesetzt. Ein umfangreiches Angebot an qualitativ hochwertigen Kursen zu unterschiedlichsten Themen bietet z.B. die Virtuelle Hochschule Bayern [www.vhb.org].

Neben den genannten vhb-Kursen, die inzwischen mit hohen jährlichen Zuwachsraten in der Breite genutzt werden, gibt es eine große Anzahl von e-Learning-Materialien, deren Erstellung in der Regel öffentlich gefördert wurde. Als Beispiel sei hier die im Rahmen des BMBF-Programms "Neue Medien in der Bildung" entwickelte Lernumgebung im Bereich der Geoinformatik genannt [www.geoinformation.net], an deren Entwicklung die Gruppe der Autoren dieses Aufsatzes in den Jahren 2002-2005 beteiligt war. Diese Umgebung enthält eine große Anzahl von Lernmodulen für die Geoinformatik, die frei zugänglich über das Internet oder per Download genutzt werden können. Diese Materialien werden aber außerhalb der jeweiligen Universität noch immer zu wenig genutzt, weil Sie z.B. nicht bekannt sind oder aus bestimmten Gründen nicht in den jeweiligen Studienplan integrierbar sind. Diese Situation ist typisch für eine Reihe von anderen, ähnlichen Projekten. Ebenfalls gilt für all diese Projekte, dass die Erstellung und Fortführung der Materialien enorm arbeits- und kostenintensiv ist [WACHOWICZ et al, 2005].

An diesen Punkten setzt das im Rahmen des e-Learning Programms der Europäischen Union geförderte Projekt eduGI [http://www.edugi.net/eduGI] an. Ziel des Projektes ist es, vorhandene e-Learning Kurse zwischen acht, über Europa verteilten Geoinformatik-Instituten auszutauschen. Jeder dieser Projektpartner steuert einen Kurs bei (vgl. Tab. 1) und bezieht im Gegenzug zwei Kurse anderer Projektpartner auf unentgeltlicher Basis, was ein sehr einfaches "Business-Modell" darstellt. Da jeder Partner einen Kurs seines vertieften Fachgebiets anbietet, wird die Qualität des Lernmaterials auf höchstem Niveau gewährleistet. Die Entwicklung neuer e-Learning Kurse ist

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Reinhardt, Dipl.-Ing. Stephan Mäs, beide AGIS, Universität der Bundeswehr München 85577 Neubiberg

dabei nicht Gegenstand des Projekts. Stattdessen wird existierendes e-Learning Material genutzt und an die Anforderungen des eduGI Projekts angepasst. Einige dieser Anforderungen sind englische Sprache, 3 ECTS (credit points) pro Kurs für die Studenten, sowie die Vorlesungs- und Übungsbetreuung und die Prüfungsdurchführung durch das anbietende Geoinformatik-Institut.

GI-Institut	Thema des e-Learning Kurses
ITC – Int. Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands	Visualisation
Harokopio University Athens	Geographic Data Bases (Advanced)
ISEGI - Universidade Nova de Lisboa, Portugal	Geospatial Data Mining
IFGI - Institut für Geoinformatik, Universität Münster	Project Management
AGIS (Arbeitsgemeinschaft GIS), Universität der Bundeswehr München	GI Standards
Uppsala University, Department Earth Sciences Uppsala, Sweden	Virtual excursions in Earth Sciences
Institut für Geoinformation und Kartographie, TU Wien	Data Quality
University of West Hungary, College of Geoinformatics	Data Acquisition and Integration

Tab. 1: Die Partner im EduGI-Projekt und Ihre angebotenen Kurse

Über eine gemeinsame e-Learning Plattform<sup>2</sup> können alle Partner ihre Lernmaterialien im Internet zur Verfügung stellen, Online-Seminare mit Voice over IP oder textbasierten Chatrooms organisieren und Prüfungen entwerfen und durchführen. Im Anschluss an den Kurs findet innerhalb des Projektes eine Evaluation durch die Studenten und deren Betreuer statt, so dass das anbietende Institut über dieses Feedback seinen Kurs weiter verbessern kann. Zum Abschluss des Projektes sollen die so verbesserten Kursmaterialien auf der eduGI Projektwebseite verfügbar gemacht werden.

## 2 Bereitstellung eines Kurses für die Studenten anderer europäischer Institute

Der von AGIS der Universität der Bundeswehr München angebotene Kurs befasst sich allgemein mit GI- Standards und bietet folgende Inhalte:

- Einführung und Motivation für Normen und Standards
- Normung und Standardisierung bei ISO und OGC
- o Syntaktische und semantische Interoperabilität

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Im eduGI Projekt wird die Academic Suite der Firma Blackboard eingesetzt (vgl. Abb.1): <u>http://www.blackboard.com/products/Academic\_Suite/index</u>

- o Qualität von Geodaten
- o ISO and OGC Geometriestrukturen und Objektbildung
- o Standardisierte Übertragung von Geodaten über das Internet
- o Anwendungsbeispiele und praktische Übungen mit Web Map und Web Feature Services

Die empfangenden Institute sind an der TU Wien und der Universität Nova Lissabon. Das verwendete Material für den Kurs entstammt größtenteils dem Projekt "Geoinformation - Neue Medien für die Einführung eines neuen Querschnittsfaches" (http://www.geoinformation.net), in welchem die beteiligten Hochschulen das zum damaligen Zeitpunkt verfügbare GI Lehrangebot durch die Nutzung neuer Medien verbessert und modernisiert haben. Die Lehrmaterialien wurden damals vor dem Hintergrund eines "unterstützenden Einsatzes in der Präsenzlehre" konzipiert und realisiert (HELMICH et al. 2004). Da die Kurse im eduGI Projekt unabhängig von der Präsenzlehre durchgeführt werden und die Studenten deshalb zur selbständigen Arbeit gezwungen sind, mussten die Materialien nicht nur aktualisiert und ins Englische übersetzt, sondern auch relativ umfangreich überarbeitet werden. Über zahlreiche Beispiele wurde versucht, die Inhalte besser zu veranschaulichen und durch Zwischenbilanzen und Übersichten Zusammenhänge klarer darzustellen. Insgesamt war der Überarbeitungsaufwand dadurch umfangreicher als ursprünglich geplant.



Abb.1. Blackboard session

Damit sich die Kursinhalte optimal in die Studienpläne der empfangenden Institute integrieren lassen, müssen die erforderlichen Vorkenntnisse und Inhalte zwischen den Partnern abgesprochen werden. Beim GI-Standards Kurs der AGIS sind zum Beispiel Grundkenntnisse im Umgang mit UML und XML erforderlich, um die zahlreichen Beispielgraphiken und Dokumente zu verstehen. Diese Vorkenntnisse waren aber nur bei den Studenten der TU Wien vorhanden; für die portugiesischen Studenten mussten die Kursinhalte um ein Tutorium für UML und XML erweitert werden. Hierbei war von Vorteil, dass es zu beiden Themen eine Vielzahl von frei verfügbaren online Tutorien gibt und diese nur entsprechend der Schwerpunkte ausgewählt und

verlinkt werden mussten. Unter Umständen können solche Anpassungen und Erweiterungen der Kursinhalte aber sehr aufwendig sein. Die unterschiedliche Arbeitsbelastung wurde durch eine zusätzliche Anrechnung von 30 Stunden (1 ECTS credit point) für die portugiesischen Studenten ausgeglichen.

Zusätzlich zu den für das Selbststudium bereitgestellten Materialien fanden über die e-Learning Plattform so genannte "synchrone Sitzungen" (synchronous sessions) als Einführungsveranstaltung und später regelmäßig während des Kurses statt (vgl. Abb.1). Bei diesen Sitzungen konnten die Studenten online Fragen stellen und die entsprechenden Problemthemen wurden diskutiert. Probleme gab es hier bei der Festlegung der Uhrzeiten der synchronen Sitzungen. Da die Kurse an der Universität Nova Lissabon im Rahmen eines Fernstudiums angeboten wurden waren seitens der portugiesischen Studenten eher die späten Abendstunden gefragt, was sich, verstärkt durch die Zeitverschiebung, nicht mit den Vorstellungen unserer Tutoren und der österreichischen Studenten in Einklang bringen ließ. Hier mussten entsprechende Kompromisse gefunden werden. Prinzipiell wurde versucht den Studenten über ein Diskussionsforum bzw. durch direkten Kontakt zu den Tutoren jederzeit die Möglichkeit zu geben, Fragen zu stellen. Dieses Angebot wurde während des Kurses jedoch relativ wenig genutzt.

Insgesamt waren für den GI Standards Kurs 23 Studenten angemeldet, von denen sich aber nur 13 aktiv beteiligten und die praktischen Übungen und Prüfungen absolvierten. Diese relativ niedrige Quote resultiert daraus, dass der Kurs an beiden Partneruniversitäten nur als Wahlpflichtfach in den Studienplan integriert war und deshalb nicht zwingend absolviert werden musste. Wie die Diagramme in Abbildung 2 veranschaulichen, wurde die Möglichkeit der flexiblen Zeiteinteilung beim Selbststudium von den Studenten ausgenutzt. Die Zugriffe auf die Plattform erfolgten an allen Wochentagen und insbesondere auch in den späteren Abendstunden.



Abb. 2: Anteilige Nutzung der Lernmaterialien in Abhängigkeit von Wochentag und Uhrzeit

Die Kursevaluationen der Studenten und deren Betreuer ergaben ein durchweg positives Feedback für unseren Kurs. Dieser Zuspruch zeigte sich auch in den synchronen Sitzungen und nicht zuletzt auch in den guten Resultaten bei der Abschlussprüfung. Dieses Resultat zeigt auch, dass sich selbst ein mitunter trockenes und teilweise sehr abstraktes Thema wie GI Standards und Standardisierungsprozesse erfolgreich mit Hilfe von elektronischen Lernmaterialien vermitteln lässt.

# 3 Erfahrungen bei der Nutzung von e-Learning Kursen anderer europäischer Institute

Die Kurse, die jedes der Partnerinstitute erhält, müssen so ausgewählt werden, dass sie sich zeitlich und thematisch in den Studienplan integrieren lassen und diesen sinnvoll ergänzen, was in der Praxis in unterschiedlichen Ländern mit unterschiedlichen Semesterzeiten und Curricula nicht immer einfach ist. Im Rahmen des eduGI Projektes erhalten die Studenten der Universität der Bundeswehr von der Harokopio Universität Athen einen Kurs über Geodatenbanken und von der Universität Münster einen Kurs zum Thema Projektmanagement. Letzterer ist derzeit im Gange, so dass hier nur als Zwischenbilanz erwähnt werden kann, dass er bisher einen positiven Zuspruch findet.



Abb. 3.: Tutor und Studenten währen einer Sitzung

Der Geodatenbanken-Kurs der griechischen Partner wurde bereits erfolgreich von unseren Studenten abgeschlossen. Dieser Kurs konzentrierte sich auf theoretische und praktische Fragestellungen aus dem Bereich der Geodatenbanken. Die Studenten lernten wie man mit Hilfe eines kommerziellen Datenbank Managementsystems eine Datenbank konzipiert und implementiert und welche XML basierten Datenformate bei der Modellierung und der Visualisierung von Geodaten zum Einsatz kommen können. Der Kurs wurde gleichzeitig für unsere Studenten und Studenten der Westungarischen Universität gehalten. Die erforderlichen Vorkenntnisse wie Grundlagen zu Datenbanken, relationalen Datenbankmodellen und SQL waren bei den teilnehmenden Studenten schon vorhanden. Ähnlich wie beim GI-Standards Kurs fanden hier auch in regelmäßigen Abständen synchrone Sitzungen statt, die sich jedoch hauptsächlich auf die Einführung und Vorbereitung der jeweils kommenden Aufgaben konzentrierten. Um einen reibungslosen Ablauf zu garantieren stand den Studenten während des gesamten Kurses und während der synchronen Sitzungen im PC-Pool ein Mitarbeiter unseres Instituts zur Seite (vgl. Abb.3). Im Nachhinein betrachtet wäre diese "Sicherheitsmaßnahme" aber nicht notwendig gewesen. Die Kommunikation mit den griechischen Betreuern sowie in den Arbeitsgruppen der Studenten lief reibungslos. Die praktischen Übungen zu den Geodatenbanken fanden über eine Serverplattform statt, so dass auf den lokalen Arbeitsrechnern der Studenten

lediglich eine frei verfügbare Software für die Visualisierung installiert werden musste. Dadurch wurde die flexible Arbeitsplatzwahl nicht durch den Einsatz lizenzpflichtiger Software eingeschränkt.

Für unsere Studenten war es die erste Erfahrung mit e-Learning und auch das erste Mal, dass sie sich den vollständigen Lerninhalt selbst erarbeiten mussten und nicht während der Vorlesung vermittelt bekamen. Insbesondere der Einsatz der Internetmedien und die englische Kommunikation mit Tutoren und Studenten der anderen Institute sind Herausforderungen, die offensichtlich gerne angenommen werden. Die nachträgliche Evaluation des Geodatenbanken-Kurses zeigt, dass diese völlig andere Art der Wissensvermittlung bei den meisten Zuspruch findet, von einigen Wenigen aber auch strikt abgelehnt wird. Grund hierfür scheint im Wesentlichen die persönliche Neigung des einzelnen Studenten zu sein. Die meisten Studenten beurteilten die Konfrontation mit den Anforderungen der selbständigen und erfolgsorientierten Bearbeitung eines komplexen Themas als hilfreich für die anstehenden Aufgaben während der Diplomarbeit. Die meisten unserer Studenten würden auch gerne wieder an einer solchen Form des Unterrichts teilnehmen.

### 4 Resumé

Die wesentlichen Erfahrungen aus der Sicht des Lehrenden: das eduGI Projekt zeigt, dass ein nicht kommerziell ausgerichteter Austausch von vorhandenen e-Learning Kursen zwischen Universitätsinstituten funktionieren kann. Ein solcher Austausch muss natürlich nicht auf Geoinformatik Institute begrenzt sein. Voraussetzung ist jedoch immer eine genaue Absprache der erforderlichen Vorkenntnisse und Lerninhalte, des Bearbeitungsaufwandes und die Anerkennung der Prüfungsresultate. Die Integration der empfangenen Kurse in den Studienplan kann größere Probleme bereiten, vor allem wenn mehrere Universitäten den gleichen Kurs zur gleichen Zeit empfangen.

Ein ganz wesentlicher Vorteil ist, dass sehr arbeitsintensive Kurse, wie z.B. zu Geodatenbanken nicht n Mal vorbereitet, und die entsprechenden Ressourcen nicht n-fach vorgehalten werden müssen. Wenn diese Kurse für Studenten mehrerer Universitäten gleichzeitig angeboten werden ist es möglich, den Lehraufwand der teilnehmenden Institute deutlich zu reduzieren. Im Idealfall wird dadurch sogar der Mehraufwand bei der Erstellung der für e-Learning aufbereiteten Lernmaterialien kompensiert. Diese Kompensation erfolgt noch leichter, wenn der Austausch über mehrere Jahre erfolgt. So ist auch die Fortsetzung dieses im Rahmen von eduGI durchgeführten Experiments geplant. Der Austausch von Lernmaterialien ist allerdings auch schon allein wegen der internationalen Zusammenarbeit und Kommunikation für Studenten und Tutoren eine Bereicherung!

Aus der Sicht der Studierenden gilt der oft zitierte e-Learning Vorteil "überall und zu jeder Zeit verfügbar" nicht unbedingt für "full-time" Studenten unserer Universität. Trotzdem waren die Beurteilungen unserer Studenten überwiegend positiv. Ein Student beurteilt das Experiment folgendermaßen: "Alles in allem war dieser Kurs eine völlig andere Art der Wissensvermittlung. Dies war das erste Mal, dass wir uns den Lerninhalt selbst erarbeiten mussten und nicht während der Vorlesung vermittelt bekamen. In Hinsicht auf die anstehenden Aufgaben (Seminar,

Oberseminar und Diplomarbeit), war es sehr hilfreich mit dieser Arbeitsweise konfrontiert zu werden. Wenn man auf die erworbenen Informationen blickt, war der Kurs sehr fördernd, da man sehr erfolgsorientiert an einem komplexen Thema gearbeitet hat. Deshalb würde ich auch wieder an einer solchen Form des Unterrichts teilnehmen".

## 5 Dank

Die Herren Hptm Dipl.-Ing. Jörg Renter und Dipl.-Geogr. Stefan Strobel haben zu dem Projekt durch Mitarbeit und als Tutoren maßgeblich beigetragen.

## 6 Literaturverzeichnis

- BROX, C. (2006): Exchange of Complete E-Learning Courses First Experiences with a Business Model, EUGISES 2006, proceedings
- HELMICH, R.; JOOS, G. & REINHARDT, W. (2004), Lernmodul Normung und Standardisierung -Konzept, Inhalte und Erfahrungen. - In: Plümer, L.; Asche, H. (Hrsg.): Geoinformation -Neue Medien für eine neue Disziplin. 2004.
- WACHOWICZ, M.; BROX, C. & REINHARDT, W. (2005). Challenges on Advancing GI Education in Europe. *GEOinformatics* 6(8): 10-13.

# EyeLearn: E-Learning support for photogrammetry and remote sensing lectures

### GERHARD SCHROTTER<sup>1</sup>, MARTIN SAUERBIER<sup>1</sup>, HENRI EISENBEISS<sup>1</sup>, EMMANUEL BALTSAVIAS<sup>1</sup>, THOMAS KORNER<sup>2</sup>, MARCO LEHRE<sup>2</sup> & THOMAS PIENDL<sup>2</sup>

Abstract: Since 2006, the Bologna model is fully implemented in the Geomatics program at ETH Zurich with a Bachelor and a Master course. Lectures and courses had to be newly defined, and additionally, a project was started in order to enhance namely two lectures. Fundamentals of Photogrammetry and Fundamentals of Remote Sensing, by means of E-Learning tools. These tools are not meant to substitute traditional contact education, such as exercises and lectures, but to provide the students useful information and learning methods in order to deepen and audit their knowledge in an attractive way. In the frame of the EyeLearn project, started in August 2006, a virtual learning environment will be deployed. For efficient generation, management and update of the provided contents, the environment will be placed in a Learning Management System (LMS). The LMS is maintained and provided by NET (Network for Educational Technology), the E-Learning Competence Center of ETH Zurich and the Single Sign-On Authentication and Authorization Infrastructure (AAI) of SWITCH is used. AAI allows students to access e-learning systems at multiple Swiss universities with a single login. On this well defined platform we integrate a pilot learning module. We focus on parts from lecture Fundamentals of Remote Sensing and define this module as the core for ongoing development. Beyond the lecture scripts, exercise information, useful links to Web resources, which was provided for our lectures since years, the content will also consist of videos (e.g. for introduction), quizzes and interactive applets which are suited to clarify complex topics, e.g. the influence of orbit and sensor parameters of earth observation satellites on the characteristics of the images. In the paper, we will describe the concepts and software tools that are used at ETH for developing learning modules and the concrete plans and so-far implementation for the two courses listed above.

## 1 Introduction

In August 2006, the Chair of Photogrammetry and Remote Sensing at ETH Zurich started the E-Learning project EyeLearn, aiming at support of the two courses Fundamentals of Photogrammetry and Fundamentals of Remote Sensing, which are given in the frame of the Bachelor studies in Geomatics Engineering and Planning at ETH Zurich. The project is conducted in cooperation with the ETH NET (Network for Educational Technology), the center of competence in E-Learning at ETH Zurich (NET 2007). ETH NET identifies and evaluates new developments in the E-Learning domain and moreover supports and consults lecturers of ETH Zurich and the University of Zurich in terms of efficient and didactically meaningful design and application of E-Learning modules. Furthermore, ETH NET hosts the LMS Blackboard, which was chosen to be used as an E-Learning platform for the aforementioned courses. The goal of our E-Learning initiative is to enhance, but not to replace, the traditional oral lectures and

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> ETH Zurich, Institute of Geodesy and Photogrammetry, E-mail: {gerhard.schrotter, msb, ehenri, manos}@geod.baug.ethz.ch

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> ETH Zurich, Network for Educational Technology, E-mail: {korner, lehre, piendl}@net.ethz.ch

the associated labs and exercises by using the potential of modern didactic tools and appropriate methods provided by Learning Management Systems (LMS). Beyond the material already provided for the students since years via the Internet in a static mode, such as literature and web resources, Open Source software, lecture scripts etc., new contents will be provided in a more interactive way (PATERAKI et al., 2005). Embedded into the LMS Blackboard, the contents are published for the course participants in a more structured form. In the photogrammetry and remote sensing community, E-Learning is used since years in different occurrences. The International Society of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS) as the most important professional association in the field, emphasizes the significance of education through its Technical Commission VI, which is dedicated to education and outreach. Among other topics it deals with the promotion and development of computer-assisted teaching and training as well as with distance learning. Each four years, outstanding E-Learning tools are being awarded with the CATCON prize by ISPRS. A comprehensive variety of different tools and concepts dealing with distance education can be found in the literature, ranging from complete Web-based digital photogrammetric processing software, such as ARPENTEUR (DRAP et al., 2004), standalone modules for specific tasks, such as DiMoTep (FLÜHLER et al., 2004), animations which describe complex issues demonstratively (GRABMAIER, 2004) to concepts for the accomplishment of semester works by means of E-Learning support. Similar approaches can be found for remote sensing and spatial information education (BILL & ZEHNER, 2004; KATTERFELD & SESTER, 2004). In EveLearn, we mainly concentrate on the development of small modules such as animations and interactive applets which are suited to explain one specific issue.

### 2 Learning Management System (LMS) maintained and provided by NET (Network for Educational Technology)

Buzzwords like "Web 2.0" and "Wiki" work as gate opener for the acceptance of e-learning in public opinion. The use of Internet and computer technologies in an educational context allows learning scenarios which are more flexible in time and space. Thus where in conventional learning scenarios like a lecture a student had to come to university at a well-defined date and time, this could be handled more flexible with e-learning components like online content or podcasts. But these technologies do not provide a better learning in general. To find e-learning scenarios with prospect of success, the faculty has to integrate these technologies into an organic lecture planning, using its benefits. At ETH Zurich, NET is the e-learning support centre providing comprehensive services to lecturers by supporting simple, stand alone e-learning applications. The e-learning toolbox (ELBA) contains independently usable e-learning applications. ELBA provides for example a forum, a wiki, quiz-, survey- and concept map-tool for stand-alone use. With very little additional effort, the teaching staff should be able to significantly improve student interaction which is faciliated by various ready-to-use scenarios for lecturers. At ETH Zurich, the NET-Network for Educational Technology is the e-learning support centre providing comprehensive services to lecturers by supporting.

- A Portfolio of Learning Management Systems (LMS)
  - While Blackboard is a commercial LMS, ILIAS and Moodle are open-source platforms within the portfolio. In a LMS, one can map learning paths, parallel to a lecture or as a distant learning course, using various e-learning tools (forum, wiki, quiz, ...). Student management is organized by the LMS for all activated modules. And even online-assessment is possible.
- A Portfolio of Groupware and E-Collaboration Tools (BSCW, Marratech, Open Classroom) BSCW as classical groupware tool is mainly used to organize asynchronous student group work. E-collaboration tools allow synchronous collaboration with audio and video communication, whiteboard, application sharing, collaborative browsing and content presentation.
- Adequate audiovisual technologies (podcasts, video on demand, streaming, ...) in teaching.

## 3 A learning platform for Fundamentals of Photogrammetry and Remote Sensing: Concept and Design

### 3.1 Blackboard CE

The online learning environment "EyeLearn" uses the Blackboard CE Learning Management System, hosted by NET. This software application is provided by the Blackboard Inc., a well-known market leader in the field of commercial Learning Management Systems. It enhances teaching and learning, is intuitive and easy-to-use for lecturers and is built on a scalable enterprise technology foundation that facilitates growth and performance. Higher education institutions around the world use Blackboard CE to:

- 1. Create powerful learning content using a variety of Web-based tools
- 2. Develop custom learning paths for individual students or groups
- 3. Facilitate student participation, communication, and collaboration
- 4. Provide self assessments to learners or evaluate students' work using a rich set of assessment capabilities

Blackboard CE as well as our other LMS are connected to AAI<sup>3</sup>. AAI (Authentication and Authorization Infrastructure) is the inter-organizational single sign-on system of the Swiss universities and universities of applied sciences. In a nutshell, the objective of the AAI is to simplify inter-organizational access to Web resources. AAI facilitates significantly student access to and student management within a LMS.

### 3.2 Fundamentals of Photogrammetry

The course Fundamentals of Photogrammetry is an obligatory course of the Geomatic Bachelor program at ETH Zurich. This course focuses on the geometrical, physical and instrumental basics of Photogrammetry.

In the following section the content and the learning target of Fundamentals of Photogrammetry

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> To get further information on AAI, please visit <u>http://www.switch.ch/aai/</u>

will be described. Using this information the need and the potential usage of an E-Learning platform is presented. Finally, the concept of three examples of E-Learning tools for Fundamentals of Photogrammetry will be characterized.

### 3.2.1 Content of Fundamentals of Photogrammetry and learning target

The course Fundamentals of Photogrammetry emphasizes the following topics: Definition and history of Photogrammetry and Remote Sensing, basics of photometric and image quality, non-photographic sensors, metric cameras, single image processing, basics of the analytical and digital Photogrammetry, stereoscopy and parallax, flight planning and navigation of the image flight, orientation of a stereo model and an overview about digital photogrammetric workstations. Therefore, in the course the students will get knowledge of photogrammetric instruments, methods and applications as well as the comprehension of data acquisition, processing and operations. The operational use of the methods will be topic of the continuing courses.

For the better understanding of the learning contents the lectures are mixed with exercises and home works, which emphasizes on image understanding, image rectification, digital image processing, stereo measurement and flight planning. Nevertheless, due to the limitation of contact hours, not all topics can be supported with exercises. Therefore, an E-learning platform focusing on specific topics of Fundamentals of Photogrammetry, which were partly or not covered by the exercises, would support the comprehension of the learning contents. The students could use these tools for the refurbishment of the lecture notes and the preparation for the examination at any time. Using these tools, it should be possible to understand specific methods and the influence of the different input parameters on the method itself. To get experience with the E-learning environment, we decided to develop three different tools, which are described in the following.

### 3.2.2 Concept of the three E-Learning tools

The first tool will support the exercise digital image processing and will focus on image filter operations and edge extraction. The implemented function will have explanations, which describe the use and output of the operator. Furthermore, the user will have the possibility to load a specific image, change the parameters of an algorithm, look at the output image and understand the effect on the parameters on the image output.

The second tool will focus on rotation matrices. We will develop a tool where a camera with a fixed focal length is situated in the center of a cube and all sides are synthesized with different texture. The color and pattern of the sides of the cube will be designed in a way that bordering sides are clearly distinguished from each other. In the user interface, the user will see the starting image, which defines the starting viewing direction. The second image of the user interface is the final image which the student has to generate. Therefore, the student has to combine different rotations in a way, that the final image and the image generated by the students are showing the same area. This tool can be easily extended by integrating further changeable parameters like focal length and the position of the projective center. If the user is not successful, he will get hints to the solution. The third tool will deal with the relative orientation of a stereo pair. In a first step, the input parameters (number of tie points, the point measurement accuracy and the

image overlap) will be defined. In a second step, the user has the task to measure tie points in the image and after finishing the measurements, the relative orientation will be calculated. Output of the orientation will be accuracy and reliability values of the estimated parameters visualized with colored bars. These bars allow the user an easy interpretation of the calculated values. If the values are not in a given limit, the user will get a feedback how he could improve the results. For example he has to re-measure some tie points, achieve a better distribution, increase the number of points, etc.

### 3.3 Fundamentals of Remote Sensing

The course "Fundamentals of Remote Sensing" introduces the Bachelor students in their 5<sup>th</sup> semester to satellite remote sensing. The main chapters of the course's content are listed as an overview in the following:

- Introduction (Terminology, definitions, examples of data and products, electro-magnetic spectrum, spectral properties of objects)
- Sensors and platforms, orbital parameters
- Data acquisition, Web resources, sensor modeling
- Data preprocessing
- Rectification, generation of DEMs and orthoimages
- Fundamentals of classification
- Image spectroscopy and hyperspectral imaging
- Object extraction
- Overview of high-resolution satellite sensors processing and products
- Processing and applications of Radar data
- Remote Sensing software packages and case studies

Furthermore, the course will offer students to gain practical experience with various software packages – Open Source as well as commercial packages – by providing the software (HyperCube, LEO Works, MultiSpec32, ImageJ) and data from a case study. The case study will be concerned with image processing for satellite imagery. For this purpose, additionally the interactive filter tool described in 4.1 will be used. Until now, these software packages and test data were provided via links on the website related to the lecture.

### 3.3.1 Concept for E-Learning modules

Different tools embedded into the LMS will be provided to the course participants aiming at a better understanding of course contents, an easy access to basic knowledge and data, as well as software for the accomplishment of the case study. The first modules to be implemented are mainly concerned with the first two chapters of the lecture, introduction, sensors and platforms. In form of a video, different features of space borne sensors will be introduced in order to give examples of the most important sensors such as IKONOS, QUICKBIRD and LANDSAT, but also to clarify terms such as resolution (geometric, radiometric, temporal, spectral) based on examples. The video will consist of visual content enhanced by textual speech annotations.

A further section will deal with case studies. The required data as well as Open Source software

needed to conduct the exercises will be provided through the LMS, such that students are free to work on the exercises e.g. at home.

Photogrammetric processing of satellite imagery is based on complex geometry. Issues concerning orthorectification, DEM generation or the geometry of satellite orbits can efficiently be pointed out by means of animations in form of image sequences (GIF animations). Such animations will be prepared for the aforementioned issues.

## 4 Realization and implementation of the E-learning platform with Blackboard CE

### 4.1 Design of the platform in Blackboard CE

In the first phase of the course-design we have collected material with the help of the so called Media Library. We have used this Media Library Tool to create a database of text, image, video, and audio entries. We have organized these library entries into collections. Students can view the media library entries we have created by going to the Media Library tool, but we can also create links to allow students to access media library entries from within files. Students can click the link in the file to display the text, image, video, or audio file in a pop-up window. A snapshot of the File Manager shows the structure of our Media Library and some of the available Software Products.



Figure 1: The interface of the Blackboard E-Learning system. In the left part of image, tabs are showing three different views. The Build, Teach, Student View tabs are indicating three different levels of the E-learning system for building, content filling, and using.

### 4.2 Fundamentals of Photogrammetry (Applets)

We have implemented a Java Applet to explore different filter kernels. This applet is programmed with functions from the ImageJ library. It allows the students to load an image from their local disc and change the kernel (matrix) of the filter. After pressing the filter button, the result is immediately shown. This interactive tool starts from the NET server directly.



Figure 2: The user interface of the Java Applet. The matrix can be filled out by students interactively. The result of the filter kernel can be analyzed online. In the right snapshot, a horizontal Sobel operator is used.

Another package is written in C++ and is compiled for Windows/Linux platforms. The program can be started from command line using input parameters to handle different tasks. A virtual camera with a fixed focal length is located in the center of a cube and all sides are synthesized with different texture. This GUI is developed in OpenGL<sup>TM</sup> and enables students to explore the scene in three-dimensions. The color and pattern of the sides of the cube will be designed in a way that bordering sides are clearly distinguished from each other. The student has to combine different rotations in a way, that the final image and the image generated by the students are showing the same area.

In addition, we use this package for evaluation of relative orientation. Two rendered views of a textured cube are projected into the image plane of two virtual cameras at given positions. These rendered images are the starting point for the students to measure correspondences and to run a relative orientation procedure. Additionally to the three dimensional view, the program writes out Matlab<sup>TM</sup> scripts, which show the residual vectors and can serve for further analysis and calculations.

### 4.3 Fundamentals of Remote Sensing (Video and Exercises)

As mentioned above, an introductory video will be produced which gives an overview of operating satellites and their orbit parameters, data transfer to the ground station, image processing and derivable products. The video will be integrated into the media library and therefore is accessible to the students. Furthermore, the media library contains embedded interactive applets and animations from (NASA 2007a, 2007b) and (ESA 2007) as well as links to Web resources (JPL ASTER 2007, USGS 2007).

For non-obligatory case studies, which can be conducted by means of Open Source satellite image processing software such as LEO Works, HyperCube or MultiSpec32, based on the LMS we will provide satellite image data such that students can try methods addressed in the lectures

practically. The required software and data will be provided through Blackboard, which also offers the opportunity to the students to upload their results, mostly images, for control purposes. An interactive tool will be programmed in Java which allows the students graphical and numerical modifications of orbit parameters and a direct visualization of the effects of changes of parameters such as flying height, inclination, focal length and number of CCD elements on resolution, swath width and earth surface coverage of the resulting images.

## 5 Conclusions

The described concepts are currently being developed and implemented under the LMS Blackboard. First applications related to the lectures are planned for the autumn semester 2007 for Fundamentals of Remote Sensing and for the spring semester 2008 in Fundamentals of Photogrammetry. The described tools and further implementations will be successively developed over the duration of EyeLearn, which finishes in August 2008. Once the contents of the LMS are implemented, maintenance and updating of the contents will be possible in a more comfortable and structured way. Each lecturer, internal or external, will have access and can use the manifold options of Blackboard, e.g. the media library. Moreover, a LMS can also offer a platform for the students with functionality that goes beyond the options a simple website can offer.

## 6 References

- BILL, R. & ZEHNER, M. L., 2004. Interactive learning module on spatial visualization of statistical data. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXV, Part B6, Istanbul, pp. 163-167.
- DRAP, P., GRUSSENMEYER, P., CURTINOT, P. Y., SEINTURIER, J. & GAILLARD, G., 2004. Presentation of the web based ARPENTEUR tools: Towards a photogrammetry based heritage information system. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXV, Part B6, Istanbul, pp. 123-128.

ESA 2007. Interactive satellite tracking. http://orbits.eoportal.org/ (last accessed in May 2007).

- FLÜHLER, M., NIEDEROEST, J. & AKCA, D., 2005. Development of an educational software system for the digital monoplotting. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 36, Part 6W30 (on CD-ROM).
- GRABMAIER, K. A., 2004. Animated tools for illustration, demonstration and study of geometric relations in photogrammetry and remote sensing using MS-EXCEL. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXV, Part B6, Istanbul, pp. 129-134.
- Höhle, J., 2004: Designing of course material for e-Learning in photogrammetry. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXV, Part B6, Istanbul, pp. 89-94.
- JPL ASTER, 2007. Spectral library http://speclib.jpl.nasa.gov/ (last acessed in May 2007).
- KATTERFELD, C. & SESTER, M., 2004. Desktop virtual reality in E-Learning environments. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXV, Part B6, Istanbul, pp. 154-159.

- NASA 2007a. Scientific Visualization Studio. <u>http://svs.gsfc.nasa.gov/index.html</u> (last accessed in May 2007).
- NASA 2007b. Interactive applet on satellite orbit visualization. http://science.nasa.gov/Realtime/JTrack/3D/JTrack3D.html (last accessed in May 2007).
- NET 2007. Network for Educational Technology. <u>http://www.net.ethz.ch</u> (last accessed in May 2007).
- PATERAKI, M. & BALTSAVIAS, M., 2005. Eye Learn An interactive WEB based e-Learning Enviroment in Photogrammetry and Remote Sensing. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 36, Part 6W30 (on CD-ROM).
- SCHIEWE, J., 2005: Quo vadis photogrammetry education? The contribution of E-Learning. In: Fritsch, D. (Ed.): Photogrammetric Week '05, Wichmann-Verlag: 295-302.
- USGS 2007. Digital Spectral library. <u>http://pubs.usgs.gov/of/2003/ofr-03-395/ofr-03-395.html</u> (last acessed in May 2007).

# Computerunterstütztes kollaboratives und kooperatives Lernen in der Geoinformatik

### BEATA GRENDUS<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Um E-Learning in der Aus- und Weiterbildung Geoinformatik stärker zu etablieren, müssen neue Wege gegangen werden als bisher. Einen Ansatz bietet Computerunterstütztes kollaboratives und kooperatives Lernen, bei dem die Lernenden durch synchrone und asynchrone Interaktion aktiv in den Lernprozess einbezogen werden und die Möglichkeit haben, sich sowohl vertieftes Fachwissens anzueignen als auch zusätzliche Kompetenzen und Schlüsselqualifikationen zu erlernen. Mit Hilfe einfacher Open-Source-Werkzeuge sowie entsprechender Moderation und Betreuung können unterschiedlichste Szenarien ungesetzt und ein Lernerfolg gesichert werden.

## 1 Einleitung

Online- oder Blended-Learning-Veranstaltungen sind im Wesentlichen nicht anders als Präsenzveranstaltungen. Denn Lernen findet in einem interaktiven Lernprozess statt. Der einzige Unterschied besteht darin, das Lehrende und Lernende voneinander räumlich getrennt sind. E-Learning-Angebote und die durch sie ermöglichten Formen medienunterstützten Lernens führen also nicht per se zu Lernerfolgen.

Effektive Lernprozesse finden nur unter bestimmten Bedingungen statt. Ein wichtiger Erfolgsfaktor für Weiterbildungsmaßnahmen mit E-Learning ist qualifiziertes Lehrpersonal, das in der Lage ist, die Lernenden in E-Learning-Phasen kompetent zu begleiten und zu betreuen. Pädagogische Konzepte, Methoden und Didaktik beim E-Learning lagen jedoch in der Vergangenheit weit hinter der Diskussion um die Technik. Dies hat dazu geführt, dass bisher meist einfache und kreative Gestaltungsmöglichkeiten bei computerunterstützten Seminaren vernachlässigt wurden und vielfach behauptet wird, nur mit technischem Wissen, teuren Lernumgebungen und aufwendig aufbereiteten Lerninhalten ließe sich E-Learning betreiben. Darüber hinaus existiert der weit verbreitete Glaube, mit E-Learning Kosten einsparen zu können, obwohl sich die Herstellungskosten für eine Stunde interaktiven, didaktisch aufbereiteten Inhalts auf 2.000 bis 20.000 € und mehr belaufen. Diese vermeintlichen Vorteile mögen allerdings nur auf Schulungen zutreffen, in denen Hard Skills und mehrere hundert bis tausend Personen unterrichtet werden (MAIER-HÄFERLE et al. 2005).

## 2 Problemstellung

Erfahrungen aus den vorrangig für die Hochschullehre konzipierten E-Learning-Projekten der Geoinformatik wie FerGI, geoinformation.net, gimolus, GITTA oder WEBGEO/GEOvFLEx zeigen, dass ausnahmslos alle dieselben Probleme besitzen.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Dipl.-Umweltwiss. Beata Grendus: Institut f
ür Geoinformatik und Fernerkundung, Universit
ät Osnabr
ück, Kolpingstr. 7, 49074 Osnabr
ück, bgrendus
@igf.uni-osnabr
ueck.de

Das Hauptaugenmerk lag zunächst bei Entwicklung und Einsatz der E-Learning-Materialien auf inhaltlich-technischen Aspekten. Pädagogisch-didaktische Kenntnisse wurden vernachlässigt, da sie den Hochschullehrkräften im Allgemeinen fehlen. Der Lehrstoff wurde also zeit- und kostenintensiv durch ein Team von Professoren und wissenschaftlichem Personal nach dem angebotsorientierten Prinzip ("development by teacher") für das elektronische Lernen umgesetzt. Dieser kann nun ähnlich wie in einer vom Frontalunterricht geprägten Präsenzveranstaltung zur Verfügung gestellt werden. Da die Lernenden demzufolge nicht aktiv in den Lernprozess eingebunden sind und in den meisten Fällen zudem jegliche Moderation und Betreuung durch eine Lehrperson fehlt, werden die z.T. vorhandenen Kommunikationsmöglichkeiten unterschiedlichster Art so gut wie nie genutzt. Darüber hinaus wird das zu erlangende Wissen lediglich mit Hilfe automatisch auswertbare Tests überprüft, ohne dass die Dozenten eine Einsicht in die Ergebnisse haben. Ein nachweisbarer Lernerfolg ist demnach im höchsten Maß in Frage gestellt.

Da nun nach Ende der öffentlichen Förderung aus Sonderbudgets durch Bund und Länder keines der oben genannten Vorhaben die Nachhaltigkeit gewährleisten konnte, sind die entwickelten Materialien somit nur bedingt haltbar. Eine weitere finanzielle Unterstützung gibt es derzeit kaum bis gar nicht.

## 3 CSCL

Der Begriff CSCL bezeichnet im E-Learning als Pendant zur klassischen Kleingruppenarbeit verschiedene Methoden des gemeinsamen Lernens in einer Gruppe mittels eines Computers und steht für Computer Supported Collaborative Learning. Da CSCL in Theorie und Praxis des E-Learning ein komplexes, interdisziplinäres und dynamisches Feld ist, steht anstelle des "Collaborative" auch teilweise "Cooperative" seltener " Collective" oder "Connective" (DINSE et al. 2006). In der deutschsprachigen Literatur wird vor allem von Computerunterstütztem kooperativem Lernen gesprochen, doch gibt es generelle Besonderheiten, die eine Abgrenzung notwendig machen (siehe Abbildung 1).



Abb. 1: Kooperatives und kollaboratives Lernen (nach HINZE 2004)

HINZE (2004) definiert den Unterschied folgendermaßen: Kooperatives Lernen findet überwiegend individuell in stark strukturierten Bahnen statt. Meist fügen die Teilnehmer am Schluss rein

additiv die Ergebnisse zusammen. Beim kollaborativen Lernen ist hingegen eine permanente, überwiegend selbst gesteuerte Zusammenarbeit der Gruppe vorhanden.

Aus pragmatischen Gründen, da die Begriffe sich schwer eindeutig voneinander trennen lassen und um Interpretationsspielraum zu haben, wird im Folgenden nur die Abkürzung CSCL verwendet.

### 3.1 Merkmale von CSCL

Im Mittelpunkt von CSCL stehen (Lern-)Gruppen, die nach HINZE (2004) jeweils konstitutive Elemente und Merkmale haben wie:

- gemeinsames Ziel oder Aufgabe,
- längere Zeitspanne der Interaktion,
- strukturierte Kommunikation,
- direkte Interaktion,
- gemeinsame Normen und Werte,
- gegenseitige Rollenerwartungen (Rollenstruktur),
- gegenseitige emotionale Beziehungen (Wir-Gefühl).

### 3.2 Einsatzszenarien für CSCL

CSCL kann in den folgenden wesentlichen Formen angewendet werden

### 3.2.1 Kooperative Gruppenübungen

Der Betreuer bereitet eine strukturierte Aufgabe vor, die von einer verteilten Gruppe computerbasiert gelöst wird. Die Gruppe bekommt dabei Unterstützung für die Gruppenbildung und teilweise bei der Organisation der Gruppe und Aufgabenlösung. Die Gruppenarbeit läuft fast ausschließlich selbstgesteuert, d. h. ohne intensive Betreuung. Kooperative Gruppenübungen sind meist ein Teil einer Lehrveranstaltung.

### 3.2.2 Betreute individuelle Gruppen

Diese Form findet meist in Begleitung einer Lehrveranstaltung Anwendung. Dabei erläutert und diskutiert der betreuende Dozent asynchron die wichtigsten Punkte der Veranstaltung, fasst sie zusammen und geht auf Fragen und Anregungen ei n. Durch synchrone Konferenzen beispiels-weise durch Chats und Shared Whiteboards kann die asynchrone Betreuung ergänzt werden.

### 3.2.3 Virtuelle Seminare

Asynchrone Veranstaltungen, die längerfristig verlaufen (beispielsweise an Hochschulen ein Semester). Dabei werden in Anlehnung an konventionelle Seminare Texte gelesen, analysiert und diskutiert sowie Präsentationen ausgearbeitet und bewertet. Die Teilnehmer werden in Arbeitsgruppen eingeteilt, die in Foren asynchron die Diskussionen führen. Die synchronen Termine finden im Rahmen einer Präsenzveranstaltung statt.
## 3.2.4 Virtuelles Labor

Situationen, in denen Gruppen an Experiment en und Simulationen in virtuellen Umgebungen arbeiten. Die Übungen beschränken sich noch we itgehend auf den Umgang mit spezieller Software. Möglich sind mittlerweile aber auch fernge steuerte Laborgeräte. Insgesamt ist diese Gruppenarbeitsmethode von der Technik her sehr au fwendig. Die Betreuung des Dozenten ist hier sehr intensiv und wichtig.

## 3.2.5 Kooperative Prüfungsvorbereitung

Diese Lerngruppen sind freiwillig und selbstgesteuer t. Wichtig ist hierbei, dass die Teilnehmer einen abgeschlossenen virtuellen Raum zur Kommunikation und Kooperation zur Verfügung haben, um die notwendige Vertraulichkeit zu sichern. Dennoch ist eine Unterstützung etwa bei der Gruppenfindung und bei inhaltlichen Fragen und Pr oblemen unerlässlich. Die Zusammenarbeit kann über den Prüfungstermin hinausgehen.

## 3.3 Vor- und Nachteile beim CSCL, Probleme von Lernkooperationen

Gegenüber einer rezeptiven E-Learningform hat CSCL einige Vorteile.

- Höhere Motivation: Lernende setzen sich intensiver mit dem Lernstoff und den anderen Lernenden auseinander.
- Kompetenzerwerb: Neben dem reinen Faktenwissen werden der Umgang mit den Medien, soziale Kompetenzen wie Selbstrefl exionsvermögen, Kommunikationsfähigkeit, Kooperationsbereitschaft, Konfliktfähigkeit oder Einfühlungsvermögen sowie sonstige Schlüsselqualifikationen vermittelt.
- Individualisierte Lernwege: Es gibt kaum standardisierte Lernwege, das selbstgesteuerte Lernen wird gefördert.
- Unabhängigkeit von Raum und Zeit: Es können Personen teilnehmen, die nicht regelmäßig Zeit haben oder immer an einem Ort sein können.
- Größere Informationswege, objektivere Betrachtung, Synergie: Die Gruppe verfügt über unterschiedlich gelagertes Wissen der ei nzelnen Teilnehmer und damit über eine größere Gesamtwissensmenge, was die Perspektivenvielfalt und Objektivität erhöht.

CSCL kann neben diesen Vorteilen auch negativ e Auswirkungen haben, denn Kooperation führt nicht an sich zur Aufgabenbearbeitung und Effi zienzsteigerung. Neben sozialen Erleichterungen (Prozessgewinne) gibt es soziale Beeinträchti gungen (Prozessverluste), die nicht primär auf technischen Problemen beruhen, sondern zu den allgemeinen Phänomenen von Gruppenarbeit gehören wie beispielsweise Trittbrett fahren, Verantwortungsdiffusion, Gruppendenken usw.

Neben allgemeinen potenziellen Nachteilen von Kooperation gibt es speziell für CSCL weitere Probleme, die aus dem virtuellen Kontext und der computermoderierten Kommunikation resultieren (HESSE ET AL 2002):

- Mangel an sozialer Präsenz: Es fehlen im Gegensatz zur face-to-face-Kommunikation non-verbale Signale.
- Fehlende Gruppenkoordination: zusätzliche Koordinationsanforderungen durch räumliche und zeitliche Trennung

- Fehlende Abstimmung über gemeinsamen Wissenshintergrund: Oftmals fehlt den einzelnen Teilnehmer die Vorstellung über Wissen, Kenntnisse und Fähigkeiten der anderen Gruppenmitglieder.
- Überangebot an Informationen: Große Informationsmengen sind schwer zu handhaben, Wissen muss zur Widerauffindbarkeit strukturiert werden.
- Fehlende Nachrichtenverbundenheit: Der Zyklus aus Erstellen, Übersenden, Empfangen, Bestätigen und Beantworten einer Nachricht ist verhältnismäßig aufwendig.
- Abhängigkeit von der Technik: Die Nutzung der Technik führt auch zu ihrer Abhängigkeit, z. B. wenn ein Server nicht erreichbar ist, kann nicht weitergearbeitet werden.

#### 3.4 Entscheidungsgrundlage

Folgende Fragen bieten die Möglichkeit bei einem möglichen Einsatz von CSCL Pro und Contra abzuwägen (SCHMIDTMANN ET AL. 2002):

- Ist es f
  ür die Teilnehmer schwierig/unm
  öglich bzw. sehr kostenaufw
  ändig, sich regelm
  äßig zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort zu treffen?
- Ist es f
  ür Lehrende schwierig/unm
  öglich, das geplante Seminar regelm
  ä
  ßig an einem bestimmten Ort zu leiten?
- Gibt es Inhalte, die sich besonders gut über das Internet vermitteln lassen?
- Gibt es externe Experten, die nur über das Internet teilnehmen können?

Wenn alle Fragen verneint werden, wird expl izit von einer computerunterstützten Kooperation abgeraten. Ansonsten ist entscheidend wie die Lernumgebung gestaltet wird. Für die bestmögliche Gestaltung von CSCL sind Technik, individuelle und soziale Faktoren und Pädagogik von Bedeutung (siehe Abbildung 2).



Abb. 2: Bestimmungsfaktoren beim CSCL (nach LIPPONEN 2002)

## 3.5 Werkzeuge für CSCL

Um das gemeinsame Lehren und Lernen zu ermögliche, wird eine Vielzahl an synchronen und asynchronen zumeist kostenlosen Kommunikati onswerkzeugen angeboten. Zu den synchronen Werkzeugen zählen:

- Chat,
- Instant Messaging,
- · Shared Whiteboards,
- Virtuelle Klassenzimmer usw.,

die eine Interaktion ohne wesentliche zeitliche Verzögerungen ermöglichen. Die Wissensvermittlung und -aufnahme findet gleichzeitig statt. Im Gegensatz hierzu findet bei asynchronen Werkzeugen wie:

- · Diskussionsforen,
- E-Mail,
- Wiki-Web,
- Weblogs usw.

die Wissensvermittlung zwischen Lehrenden und Lernenden zeitlich versetzt statt.

Sowohl synchrone als auch asynchrone Werkzeu ge können eigenständig als auch ein Teil von Lernumgebungen für kooperatives und kollaboratives Lernen eingesetzt werden.

# Erste Erfahrungen von CSCL in der Geoinformatik

Am Institut für Geoinformatik und Fernerkundung (IGF) der Universität Osnabrück wurde nach einer neuen Möglichkeit gesucht, die Studenten des Master of Science in Geoinformatik (5 Personen) zu betreuen, die über einen längeren Zeitraum im WS 06/07 und SS 07 (während und in der vorlesungsfreien Zeit) und an unterschiedlichen Orten (im PC-Labor des Instituts an der Universität und/oder von zu Hause) gemeinsam als Lerngruppe an einem Studienprojekt arbeiten müssen. Die Studenten sollten dabei ein Werkzeug an die Hand bekommen, mit dem sie ihre Arbeit dokumentieren und abschließend einer breiten Öffentlichkeit präsentieren können. Darüber hinaus sollte gewährleistet sein, dass sowohl Studenten als auch Dozenten überall jederzeit Zugang zum System haben.

Im Vordergrund der Projektarbeit steht vor allem die selbstgesteuerte Gruppenarbeit, d. h. die Betreuungsleistung durch die Dozenten ist relativ gering. Lediglich in den in regelmäßigen Abständen stattfindenden Präsenzterminen werden neben Aufgaben, Zielen und Problemstellungen der Arbeit inhaltliche Fragen und Lösungsansätze diskutiert, um zeitliche Verzögerungen bei der Beantwortung einzuschränken. Bei technischen Probleme oder inhaltlichen Fragen, die meist unmittelbar geklärt werden müssen, können die zahlreichen Kommunikationsmöglichkeiten wie im Allgemeinen E-Mail oder die Funktionen (Foren oder Wikis) des Lernmanagementsystems Stud.IP der Universität genutzt werden.

## 3.6 PmWiki

Das Zentrum für Informationsmanagement und virtuelle Lehre (virtUOS) der Universität Osnabrück, die E-Learning in der Hochschullehre durch Bereitstellung technischer Infrastruktur und didaktischer Beratung fördert, bietet die Möglichkeit mit Hilfe einer eigenen zentralen PmWiki-Installation - der so genannten Wikifarm – voneinander unabhängige Wikifelder zu erzeugen, um diese für entsprechende computerunterstützte Gruppenarbeiten zu nutzen (siehe Abbildung 3). Erste positive Erfahrungen im Einsatz wurden bereits in unterschiedlichen Studienfächern und Veranstaltungen gesammelt.



Abb. 3: PmWikifeld zum Studienprojekt "Potenzial hoch auflösender Fernerkundungsdaten zur Erstellung und Aktualisierung eines Baumkatasters"

Durch die Anbindung an das Lern-, Informations- und Projektmanagementsystem Stud.IP (Studienbegleitenden Internetsupport von Präsenzlehre) der Universität Osnabrück, kann über eine Schnittstelle von den dort angelegten Veranstaltungen auf die Lerninhalte in PmWiki zugegriffen werden.

PmWiki – in Anlehnung an den Urheber Patrick R. Michaud – ist ein wiki-basiertes System zum einfachen, gemeinschaftlichen Erstellen, Bearbeiten und Pflegen von Webseiten. Das Wiki basiert auf zwei zentralen Prinzipien: "Jeder kann jeden Text ändern" und "Strukturen entstehen bottom-up durch Verlinkung." Als Lernumgebungen können Wikis zentrale Kommunikationsplattformen für asynchrone, ortsverteilte Veranstaltungen sein oder veranstaltungsbegleitend die Kommunikation über die Präsenzveranstaltungen hinaus ausdehnen. Idealerweise verändern Wikis die Textproduktion hin zu einem kooperativen Prozess, der selbst organisierendes Lernen in Arbeitsgruppen begünstigt. Die Lernenden können somit kooperativ und kollaborativ als Lern-gruppe zeitlich und räumlich verteilt an Dokumenten und Aufgaben arbeiten, Wissen zusam-

menzutragen und Neues generieren ("development by learner"). Die Lehrenden haben dabei die Möglichkeit die bisherige Arbeit einzusehen, zu kommentieren und neue Lösungswege aufzuzeigen. Durch eine E-Mail-Benachrichtigung können die jeweiligen Nutzergruppen des Systems entsprechend über Änderungen in regelmäßigen Abständen informiert werden.

## 3.7 Der Nutzen

Das Hauptaugenmerk liegt wie bei jedem Wiki (hawaiischer Ausdruck für "schnell") in der leichten Bedienbarkeit für Personen mit geringen IT-Kenntnissen. Deshalb wird lediglich ein Browser benötigt. HTML- und CSS-Kenntnisse sind nicht erforderlich. Die Eingaben und Änderungen sind im Web sofort sichtbar. Dabei lassen sich nicht nur Text, sondern auch Bilder, Flash- und Videodateien einbetten. Neben diesen Vorteilen besteht der Vorteil des Wikis vor allem darin, dass mehrere Personen gleichzeitig – jedoch nicht gleichzeitig an ein- und derselben Seite – oder zeitversetzt an gemeinsamen Inhalten arbeiten können. Fehlerhafte oder ungewollte Inhalte können zudem in ihren ursprünglichen Zustand gebracht werden.

PmWiki bietet zudem die Möglichkeit, externe Passwortdatenbanken zu verwenden wie z. B. htpasswd, MySQL und LDAP. Durch ein integriertes Rechtemanagement können einzelnen Seiten für bestimmte Nutzergruppen geschützt werden.

## 3.8 Weitere Einsatzmöglichkeiten

Neben der Projektdokumentation und -präsentation lassen sich Wikis beispielsweise als E-Books im mobilen Einsatz, virtuelle Tagebücher, zur Methodensammlung oder innerhalb von Veranstaltungen zum Zusammentragen von Vorträgen nutzen. Durch die einfache Partizipation, können die Seiten immer wieder ohne großen technischen Aufwand überarbeiten werden. Die nachhaltige Wiederverwendbarkeit der Materialien ist somit möglich.

Darüber hinaus eignen sich Wikis aber nicht nur als Web Content Management System zur Textproduktion oder als Container für Inhalte, sondern können ebenso als Diskussionsforum oder als Groupware verwendet werden.

# 4 Zusammenfassung und Ausblick

CSCL ist ein umfangreiches Themenfeld und bietet sowohl Lernenden als auch Lehrenden zahlreiche Möglichkeiten des gemeinsamen Lernens mit Unterstützung des Computers. Allerdings setzt dies nicht wie bisher im E-Learning angenommen nicht unbedingt technisches Know-How, sondern vor allem Aktivität (Motivation) und Kommunikation des Dozenten (Betreuer und Moderator) voraus, denn im Vordergrund steht der aktive Lernprozess des Lernenden, der gemeinsam mit anderen Teilnehmern an Aufgaben und Dokumenten arbeitet.

Da die Erfahrungen im Einsatz von computerunterstütztem kollaborativem Lernen im Rahmen von Lehrveranstaltungen in der Geoinformatik noch kaum vorhanden sind und vielen Lehrpersonen pädagogisch-didaktische Kenntnisse im Hinblick auf E-Moderation fehlen, sollen die gewonnenen Erkenntnisse im vorgestellten Studienprojekt in didaktische und lerntheoretischen Handlungsempfehlungen für Dozenten in Geoinformatik-Studiengängen für die nachhaltige Entwicklung anderer E-Learning-Angebote münden.

## 5 Literaturverzeichnis

- DINSE, M. & BONCZEK, F., 2006: CSCL "computer supported collaborative learning", Einführungs-Skript. Projekt "CooL – Customer Oriented Organization of E-Learning". Zentrum für Informationsmanagement und virtuelle Lehre (virtUOS), Universität Osnabrück.
- HESSE, F. W., GARSOFFKY, B. & HRON, A., 2002: Netzbasiertes kooperatives Lernen. In: ISSING, L. J., KLIMSA, P. (HRSG.): Information und Lernen mit Multimedia und Internet: Lehrbuch für Studium und Praxis. Psychologie Verlags Union, Weinheim.
- HINZE, U., 2004: Computerunterstütztes kooperatives Lernen Einführung in Technik, Pädagogik und Organisation des CSCL. In: Medien in der Wissenschaft. Waxmann Verlag GmbH, Münster. Band 30.
- LIPPONEN, L., 2002: Exploring Foundations for Computer-Supported Collaborative Learning. In: STAHL, G. (ED.): Computer Support for Collaborative Learning: Foundations of a CSCL community. Proceedings of the Computer-supported Collaborative Learning 2002 Conference.
- MAIER-HÄFERLE, K. & HÄFERLE, H., 2005: 101 e-le@rning Seminarmethoden Methoden und Strategien für die Online- und Blended-Learning-Seminarpraxis. managerSeminar Verlags GmbH, Bonn.
- SCHMIDTMANN, H. & HEIDBRINK, H., 2002: Ein Leitfaden zur Leitung und Moderation Virtueller Seminare. Psychodynamik und Didaktik Virtueller Seminare.

URL: http://psychologie.fernuni-hagen.de/Leuchtturm/Leitfaden.html [30.04.2007].

# Skalierbarer Einsatz von Geographischen Informationssystemen (GIS) in Schulen

## DIRK SCHÄFER<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Geographische Informationssysteme (GIS) gewinnen auch in Schulen immer mehr an Bedeutung, doch obwohl GIS bereits in den Lehrplänen einiger Bundesländer verankert sind, entwickelt sich die Nutzung sehr langsam. Gründe dafür sind unter anderem die Kosten für die Daten und die benötigte Hard- und Software sowie Installationsprobleme und Berührungsängste mit GIS.

Es werden daher einfach zu bedienende Tools benötigt, mit denen die grundlegenden Funktionalitäten von GIS vermittelt und der Mehrwert durch den Einsatz von GIS verdeutlicht werden. Zusätzlich müssen Konzepte und Beispiele für den skalierbaren Einsatz von GIS im Unterricht entwickelt werden, um so den Zugang zu GIS so einfach und gewinnbringend wie möglich zu gestalten. Im vorliegenden Beitrag wird der skalierbare Einsatz von GIS vorgestellt und gezeigt, wie verschiedene GIS-Technologien in unterschiedlichen Klassenstufen lehrplangerecht eingesetzt werden können.

# 1 Einleitung

In der modernen Kommunikations- und Informationsgesellschaft gewinnen Neue Medien immer mehr an Bedeutung und der sichere und kompetente Umgang mit ihnen stellt in zahlreichen Berufsfeldern eine selbstverständliche Voraussetzung dar. Folglich zählen Fertigkeiten und Techniken im praktischen Umgang mit neuen Informations- und Kommunikationstechniken zu den angestrebten Bildungszielen der Wissensgesellschaft (MANDL, REINMANN-ROTHMEIER & GRÄSL, 1998). Dabei werden der Computer und das Internet als Werk- und Denkwerkzeuge im Sinne einer kreativen Nutzung von Neuen Medien eingesetzt (AUFENANGER, 2002), wobei der verantwortungsvolle und kritische Umgang mit ihnen bereits in der Schule vermittelt werden muss (STADTFELD, 2004). Vor diesem Hintergrund gewinnen die Anwendung und Nutzung von Geoinformationen und Geographischen Informationssystemen (GIS) ebenso an Bedeutung und es wird ein möglichst frühes Kennen lernen bereits in der Schule angestrebt (z.B. CREMER et al., 2004; SCHÄFER & MUND, 2001; SCHÄFER, 2006b).

Der Einsatz und die Nutzung von GIS im Unterricht in deutschen Schulen werden seit mehreren Jahren diskutiert und mittlerweile sind die Begriffe Geoinformationen und GIS auch in den Lehrplänen einiger Bundesländer integriert (z.B. Hamburg, Baden-Württemberg). Trotzdem entwickelt sich die Nutzung und Verbreitung von GIS in deutschen Schulen nach wie vor langsam. Als Gründe für die schleppende Entwicklung und die mangelnde Akzeptanz sind die Kosten für die Daten und die benötigte Hard- und Software zu nennen. Zusätzlich wird auch von Installationsproblemen (bei der Installation eines Desktop GIS im Schulnetzwerk) berichtet. Doch die zeitaufwändige Einarbeitung in das Themengebiet (und die entsprechenden GIS-Technologien) und die Komplexität des Themengebiets selbst stellen die größten Berührungsängste dar. Erprobte und leicht übertragbare Konzepte und Unterrichtsbeispiele sind

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> PD Dr. Dirk Schäfer: Geographisches Institut, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 55099 Mainz

nach wie vor rar, was zusätzlich die breite Anwendung von GIS in deutschen Schulen behindert (CREMER et al., 2004; SCHÄFER, 2004b).

# 2 Skalierbarer Einsatz von GIS-Technologien

Um den Einsatz von GIS in Schulen voranzutreiben, müssen die bestehenden Berührungsängste abgebaut und die Akzeptanz bei den LehrerInnen erhöht werden. Hilfreich sind hierfür erprobte Beispiele, die von LehrerInnen ohne aufwändige Schulung im Unterricht genutzt werden können. Daneben werden auch weitergehende und übertragbare Konzepte benötigt, um die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten des GIS in Schulen zu integrieren. Somit werden individuelle und skalierbare Lösungen benötigt, mit denen GIS in unterschiedlichen Klassenstufen lehrplangerecht eingeführt und genutzt werden können.

Der Begriff der Skalierbarkeit bezieht sich dabei auf (1) die GIS-Technologien, (2) die Schwierigkeitsstufen der Anwendungen (in Abhängigkeit von Methodenkenntnissen) und (3) die unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten von GIS (z.B. als Informationssystem, zur Visualisierung, zur Analyse). Mit dem skalierbaren Einsatz soll der Zugang zu GIS so einfach und gewinnbringend wie möglich gestaltet werden; dabei sollen die grundlegenden Funktionalitäten von GIS vermittelt und der Mehrwert durch den Einsatz von GIS im Schulunterricht verdeutlicht werden.

Im Folgenden wird der skalierbare Einsatz von GIS in Schulen anhand von Beispielen vorgestellt und gezeigt, wie verschiedene GIS-Technologien (WebGIS, Desktop-GIS) in unterschiedlichen Klassenstufen lehrplangerecht eingesetzt werden können.

#### 2.1 Einstieg mit WebGIS-Diensten

Für den Einstieg in das Themengebiet Geoinformationen und GIS bieten sich WebGIS-Dienste an, für deren Nutzung keine spezielle Software, sondern lediglich ein Rechner mit Internetanschluss benötigt wird. WebGIS-Dienste können von jeder Lehrkraft mit PC-Grundkenntnissen sowie Internet-Kenntnissen genutzt werden (PÜSCHEL & SCHÄFER, 2004; SCHÄFER, 2004b; SCHÄFER, 2005).

#### 2.1.1 Unterrichtsbeispiel "Mein Schulweg"

Das Thema "Mein Schulweg" ist in vielen Schulbüchern unter Einbeziehung klassischer Medien und Methoden integriert (z.B. LATZ, 2003): Die SchülerInnen sollen anhand eines Stadtplanes u.a. das Medium Karte kennen lernen und mit Hilfe der Maßstabsleiste die Strecke von ihrem Zuhause bis in die Schule per Luftlinie (mit dem Lineal) bzw. entlang des tatsächlichen Weges (mit einem Bindfaden) ermitteln. Durch diese Übung und Streckenmessung werden die SchülerInnen zum einen mit der Umgebung auf dem Schulweg vertraut und zum anderen im Umgang (und der Orientierung) mit Karten (z.B. Himmelsrichtungen, Maßstab) geschult.

Ergänzend können Routen- oder Kartendienste im Internet genutzt werden, wodurch zusätzlich moderne GIS-Technologien eingesetzt werden. Auf der Internetseite "map24 Deutschland" (http://www.map24.de) werden (kostenfrei) detaillierte Karten von ganz Deutschland angeboten, in die die Schulwege eingetragen und gemessen werden können. Daneben bieten zahlreiche Städte auch eigene WebGIS-Dienste mit Karten und teilweise auch Luftbildern an (z.B.

http://www.mainz.de), die ebenso für diese Übung genutzt werden können und weiterführend zur anschaulichen Vermittlung des Themas "Vom Luftbild zur Karte".

Mit dieser Übung werden u.a. die Orientierungs- und Methodenkompetenzen der SchülerInnen gestärkt. Da die Bedienung der Routen- oder Kartendienste sehr einfach ist, wird für die Durchführung im Unterricht kaum zusätzliche Vorbereitung der LehrerInnen benötigt. Dieses Beispiel ist einer der einfachsten Wege der Nutzung einer GIS-Technologie in der Schule (SCHÄFER, 2006c).

2.1.2 Unterrichtsbeispiel "Das Klima von Deutschland"

Für die methodisch-didaktische Einführung bieten sich insbesondere die auf der Seite "WebGIS-Schule" (http://www.geo.uni-mainz.de) angebotenen und bereits im Unterricht erprobten WebGIS-Dienste an (PÜSCHEL & SCHÄFER, 2004; SCHÄFER, 2004b; SCHÄFER, 2005). Die WebGIS-Dienste lassen sich problemlos bereits in der 7. oder 8. Klasse einsetzen, bieten aber auch für die Sekundarstufe II Möglichkeiten (SCHÄFER, 2004b; SCHÄFER, 2005).



Abbildung 1: Der WebGIS-Dienst "Das Klima von Deutschland"

Neben fachlichen Inhalten können mit den WebGIS-Diensten grundlegende Kenntnisse zum GIS (z.B. Layertechnik) vermittelt und wichtige GIS-Funktionen (z.B. Zoom-Funktion,

Identifizieren, Suchen, Messen, Abfrage-Manager, Hot-Links) kennen gelernt werden (PÜSCHEL & SCHÄFER, 2004; SCHÄFER, 2004B, SCHÄFER, 2005).

Der WebGIS-Dienst "Das Klima von Deutschland" (http://www.webgis-schule.de) beinhaltet die monatlichen Temperatur- und Niederschlagsdaten von 68 Klimamessstationen, die zugehörigen Klimadiagramme nach WALTER und LIETH sowie weitere Karten (Abb. 1). Mit diesem WebGIS-Dienst können inhaltlich diverse klimatologische Fragestellungen bearbeitet werden, die von räumlichen Unterschieden des Klimas, über Regionalklimate bis zu Maritimitäts-/Kontinentalitätsfragestellungen reichen können. Der WebGIS-Dienst "Das Klima von Deutschland" kann bereits in der Sekundarstufe I nutzbringend eingesetzt werden. Den einfachsten Zugang für den Einsatz in Schulen bieten Schritt-für-Schritt-Anleitungen, also didaktisch aufbereitete Arbeitsblätter, anhand derer die SchülerInnen das WebGIS und seine Funktionen kennen lernen können (PüSCHEL & SCHÄFER 2004).

Die hohe Akzeptanz von WebGIS-Diensten als Einstieg in das Thema zeigt sich u.a. auch in der Integration von Beispielen mit WebGIS in Schulbüchern: Die WebGIS-Dienste von "WebGIS-Schule" in werden z.B. in einem Schulbuch für Rheinland-Pfalz (LATZ, 2005) unter dem Punkt "Geographische Informationssysteme nutzen" vorgestellt und anhand einfacher Aufgabestellungen kommen dort verschiedene GIS-Funktionen zum Einsatz.

## 2.2 Nutzung von vorhandenen Datenbausteinen im Desktop-GIS

Aufbauend auf Erfahrungen mit benutzerfreundlichen und sehr einfach zu bedienenden Web-GIS-Anwendungen bietet sich für Fortgeschrittene die Arbeit mit einem Desktop-GIS an, welches weiterführende Funktionen und Möglichkeiten für den Einsatz in der Schule bietet. Es werden verschiedene für die Schule entwickelte bzw. angepasste Desktop-GIS (z.B. "Diercke GIS" oder "SchulGIS") angeboten. Das "Diercke GIS" ist in Schulen in Deutschland weit verbreitet und die vorhandenen und für den Unterricht aufbereiteten Datenbaussteine ermöglichen einen relativ leichten Zugang zur Arbeit mit einem Desktop-GIS.

#### 2.2.1 Unterrichtsbeispiel "Landwirtschaft in Kalifornien"

Das Thema "Landwirtschaft in Kalifornien" ist in vielen Lehrplänen (z.B. in der 8. Klasse; Lehrplan Gymnasium Rheinland-Pfalz) verankert und findet sich dementsprechend in gängigen Schulbüchern (z.B. DIELMANN et al., 2001; LATZ, 2000). Im Oberstufenband "Mensch und Raum" für die gymnasiale Oberstufe (DIELMANN et al., 2001) wird z.B. das Thema Bewässerungslandwirtschaft in Kalifornien unter der Rubrik "Globale Beziehungen und Betrachtungsweisen" behandelt. Dort werden Texte, Karten, Tabellen, Fotos und Diagramme über den Naturraum und die Bewässerungswirtschaft und den damit verbundenen ökologischen Problemen zur Verfügung gestellt. Da dort die Anzahl an Karten und sonstigen Informationen begrenzt ist, bietet sich die Arbeit (im Verbund) mit dem "Diercke GIS" an, in dem zahlreiche Karten, Diagramme und Daten (z.B. zu den Themen Klima, Böden, Landschaftszonen) vorhanden sind (SCHÄFER & MUND, 2001). Daneben können Diagramme (Abb. 2) oder eigene thematische Karten im "Diercke GIS" erstellt und anschließend im Unterrichtsgespräch diskutiert werden, wodurch u.a. die Darstellungskompetenz der SchülerInnen gestärkt wird (SCHÄFER & ORTMANN, 2002a; 2002b; 2002c).



Abbildung 2: Erstellung von Diagrammen im Diercke GIS

## 2.3 Erstellung eigener Projekte

Neben der Nutzung von bereits aufbereiteten Geodaten oder Datenbausteinen (z.B. des "Diercke GIS") lassen sich in einem Desktop-GIS auch eigene (GIS-)Projekte mit selbst erhobenen Daten durchführen. Dabei bieten sich lokale Themen bzw. Fragestellungen (mit Raumbezug) zur Bearbeitung an. Die lokalen Begebenheiten werden zunächst im Gelände kartiert, anschließend im GIS digitalisiert und dann analysiert und präsentiert. Die Durchführung solcher meist mehrtägiger Projekte bietet sich für die Sekundarstufe II an.

Aufgrund der aufwändigen Vorbereitungen sind Kooperationen z.B. zwischen Schule und Hochschule (und/oder anderen "Paten") sinnvoll, da dadurch u.a. die technische Umsetzung (für die Schule) erleichtert wird (CREMER et al., 2004; FALK & NÖTHEN, 2005; SCHÄFER & MUND, 2001; SCHÄFER & ORTMANN, 2002a, 2002b, 2002c). Im Rahmen einer solchen Kooperation zwischen dem Ratsgymnasium Rheda-Wiedenbrück, dem Geographischen Institut der Johannes Gutenberg-Universität Mainz und der Stadtverwaltung Rheda-Wiedenbrück sind bislang vier gemeinsame Projekte durchgeführt worden.

#### 2.3.1 Unterrichtsbeispiel "Grünflächenkartierung"

Bei der gemeinsam durchgeführten Grünflächenkartierung (5.-9.6.2004) wurden sämtliche Flächennutzungen der Wiedenbrücker Altstadt aufgenommen, wobei die Kartierung des

städtischen Grüns im Vordergrund stand. Neben der Bestandsaufnahme der Flächennutzung wurde auch eine Flächenbilanz des Stadtgrüns erstellt, die die Basis für Vorschläge für eine nachhaltige ökologische Ausweitung (und Vernetzung) des Stadtgrüns darstellen kann. LehramtskandidatInnen (der Universität Mainz) und SchülerInnen (des Ratsgymnasiums) haben zunächst gemeinsam im Gelände kartiert und anschließend die Kartierungsergebnisse im GIS ("Diercke GIS") digitalisiert (Abb. 3).

Ein farbiger Ausdruck der Karte des Projekts wurde mit einem Projektbericht mit dem Titel "Wie grün ist unsere Stadt? Eine GIS-gestützte Analyse der Flächennutzung der Wiedenbrücker Altstadt" als gemeinsames Projekt für den bundesweiten Wettbewerb "GIS vor Ort – Raum für lebendiges Lernen" eingereicht und mit dem dritten Platz prämiert.



Abbildung 3: Kartierung im Gelände (links) und Digitalisierung im Klassenzimmer (rechts)

# 3 Diskussion und Fazit

Vor dem Hintergrund der zunehmenden wirtschaftlichen, gesellschaftlichen und politischen Bedeutung von Geoinformationen und GIS-Technologien ist die Integration von GIS in den Schulunterricht grundsätzlich als sinnvoll einzuschätzen. GIS können im Unterricht in verschiedenen Bereichen sinnvoll als ergänzendes Medium und zeitgemäßes geographisches Arbeitsmittel genutzt werden. Die mit dem Geographieunterricht angestrebte raumbezogene Handlungskompetenz, die (1) die Sach-, (2) die Orientierungs-, (3) die Methoden-, (4) die Darstellungs- und (5) die Sozialkompetenz umfasst (KULTUSMINISTERKONFERENZ, 2005), lässt sich in weiten Teilen sehr gut mit GIS vermitteln.

Die Einführung von GIS in Schulen läuft bislang eher schleppend, was unter anderem mit den Kosten, Installationsproblemen und Berührungsängsten mit GIS verbunden ist. Skalierbare Lösungen ermöglichen eine individuelle und an die Bedürfnisse angepasste Einführung. Die Wahl der GIS-Technologie hängt (1) von der Klassenstufe, und somit von den Computer- und sonstigen Fachkenntnissen der SchülerInnen, (2) sowie vom Thema und dem Lehrplanbezug, ab. Zur Einführung von GIS in der Schule bieten sich WebGIS-Dienste an (z.B.http://www.webgisschule.de). Für die Nutzung wird keine spezielle Software benötigt, sondern nur Rechner mit Internetanschluss; an allen Schulen in Deutschland steht die Internetnutzung kostenfrei zur

Verfügung. Die mit dem PC vertrauten Nutzer können bereits nach kurzem Arbeiten mit den Werkzeugen des WebGIS umgehen. Da die Karten und Grafiken im WebGIS bereits alle aufbereitet sind, wird für die Nutzung von WebGIS wird kein detailiertes Spezial- bzw. Hintergrundwissen (z.B. Was ist ein Shapefile?) benötigt und es kann direkt mit dem WebGIS gearbeitet werden. Dementsprechend sind die Berührungsängste mit WebGIS gering und die Akzeptanz ist bei LehrerInnen und SchülerInnen sehr hoch.

Fortgeschrittene NutzerInnen, die bereits Erfahrungen mit leicht zu bedienenden (meist internetbasierten) GIS-Anwendungen gemacht haben, können ein Desktop-GIS nutzen. Beispielsweise kann das Thema "Landwirtschaft in Kalifornien" gut mit den im "Diercke GIS" vorhandenen Karten, Grafiken und Daten im Unterricht behandelt werden. Es zeigen sich Vorteile der Nutzung von GIS gegenüber klassischer Medien, wobei sich in der Praxis ein Medienverbund anbietet.

Die Erstellung eigener Projekte bringt den SchülerInnen inhaltlich/fachlich und methodisch am meisten. Gleichzeitig muss aber darauf hingewiesen werden, dass sich die Projektarbeit grundsätzlich als sehr zeitaufwändig erweist und mit umfangreichen Vorbereitungen verbunden ist. Die SchülerInnen müssen die Hintergründe von GIS kennen lernen, in die grundlegenden Funktionen von GIS eingearbeitet und zudem auf die Anwendung der benötigten Funktionen (z.B. Digitalisieren) vorbereitet werden. Dazu wird Zeit benötigt, die an anderer Stelle für die Vermittlung der Lehrplaninhalte fehlen kann. Im normalen Schulstundentakt von 45 Minuten lassen sich eigene Projekte (wie z.B. die vorgestellte Kartierung) nicht durchführen. Für derartige Projektarbeiten bieten sich daher Projektwochen an, wobei bei guter Vorbereitung vier Tage für die Kartierung im Gelände, die Digitalisierung am GIS und erste Ergebnispräsentationen ausreichen.

Der skalierbare Einsatz fokussiert die zielgerichtete und bedarfsorientierte Nutzung von GIS-Technologien und eignet sich auch für Nicht-Spezialisten, wodurch Berührungsängste abgebaut werden. Somit ermöglicht der skalierbare Einsatz einen einfachen und gewinnbringenden Zugang, der zu einem breiten Einsatz von GIS (als moderne Kulturtechnik) in Schulen beitragen kann.

# 4 Literaturverzeichnis

- AUFENANGER, S., 2002: Medienerziehung und Medienkompetenz. In: GRUBER, T. (Hrsg.), 2002: Was bieten die Medien? Was braucht die Gesellschaft. Chancen und Ri-siken moderner Kommunikation. Bayrischer Rundfunk, München: 119-123.
- BILL, R., 2002: Geo-Informations-Systeme. Geographie und Schule, 139: 3-10.
- CREMER, P., RICHTER, B. & SCHÄFER, D., (2004): GIS im Unterricht Einführung und Überblick. Praxis Geographie, 2: 39-43.
- DE LANGE, N., 2006: Geoinformationssysteme in Schulen derzeitiger Stand und zukünftiger Einsatz. JEKEL, T., KOLLER, A. & STROBL, J. (Hrsg.), 2006: Lernen mit Geoinformationen. Wichmann, Heidelberg. 11-22.
- DIELMANN, M., FUCHS, M., FISCHER, P., GERBER, W., KAMMERER, G. & KONOPKA, H.-P., 2001: Mensch und Raum. Geographie 12/13. Gymnasiale Oberstufe. Cornelsen, Berlin.
- FALK, G. C. & NÖTHEN, E., 2006: GIS in der Schule. Potentiale und Grenzen. Mensch und Buch, Berlin.

- KULTUSMINISTERKONFERENZ, 2005: Einheitliche Pr
  üfungsanforderungen in der Abiturpr
  üfung Geografie. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 01.12.1989 i.d.F. vom 10.02.2005. Web: http://www.kmk.org/doc/beschl/196-12\_EPA%20Geographie.pdf (6.10.2005)
- LATZ, W. (Hrsg.), 2005: Diercke Erdkunde 2. Rheinland-Pfalz. 7./8. Klasse. Westermann, Braunschweig.
- MANDL, H., REINMANN-ROTHMEIER, G. & GRÄSL, C., 1998: Gutachten zur Vorbereitung des Programms "Systematische Einbeziehung von Medien, Informations- und Kommunikationstechnologien in Lehr- und Lernprozesse". Bund-Länder-Kommission, H. 66. Bonn.
- MUND, J.-P. & SCHÄFER, D., 2002: GIS macht Schule Einsatz von GIS im Erdkundeunterricht. STROBL, J., BLASCHKE, T. & GRIESEBNER, G. (Hrsg.), 2002: Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XIV. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2002: 375-380.
- PÜSCHEL, L. & SCHÄFER, D., 2004: Geographische Informationssysteme (GIS) im Internet am Unterrichtsbeispiel "Das Klima von Deutschland". Praxis Geographie, 2: 4-7.
- SCHÄFER, D., 2004a: Der Monsun in Indien. Eine Internet-Erkundung mit WebGIS. geographie heute, 221/222: 40-45.
- SCHÄFER, D., 2004b: WebGIS Ein methodisches Werkzeug zum Einstieg in GIS in Schulen und Hochschulen. SCHÄFER, D. (Hrsg.),2004: Geoinformation und Geotechnologien. Anwendungsbeispiele aus der modernen Informations- und Kommunikationsgesellschaft. Mainzer Geographische Studien, Mainz.
- SCHÄFER, D., 2005: WebGIS-Schule Der Einstieg für Schulen und Hochschulen in Geographische Informationssysteme (GIS). STROBL, J., BLASCHKE, T. & GRIESEBNER, G. (Hrsg.), 2005: Angewandte Geoinformatik 2005. Beiträge zum 17. AGIT-Symposium Salzburg. Wichmann Verlag: 605-610.
- SCHÄFER, D., 2006a: WebGIS A Methodical Tool for the Introduction of GIS. Geoinformatics. 52-55.
- SCHÄFER, D., 2006b: Skalierbarer Einsatz von Geographischen Informationssystemen (GIS) in Schulen. JEKEL, T., KOLLER, A. & STROBL, J. (Hrsg.), 2006: Lernen mit Geoinformationen. Wichmann, Heidelberg: 60-69.
- SCHÄFER, D., 2006c: GIS in der Schule Skalierbarer Einsatz für eine nachhaltige Nutzung. GIS 11: 14-19.
- SCHÄFER, D. & G. ORTMANN, 2002a: GIS macht vieles einfacher. GIS im Erdkundeunterricht (Teil I). Geogr. Rdsch., 4: 52-56.
- SCHÄFER, D. & G. ORTMANN, 2002b: Aller Anfang ist schwer! GIS im Erdkundeunterricht (Teil II). Geogr. Rdsch., 6: 52-56.
- SCHÄFER, D. & G. ORTMANN, 2002c: Die Mühe lohnt sich! GIS im Erdkundeunterricht (Teil III). Geogr. Rdsch., 7/8: 59-63.
- SCHÄFER, D. & MUND, J.P., 2001: Einsatz Geographischer Informationssysteme im Erdkundeunterricht. Geographie heute, 195: 18-21.
- STADTFELD, P., 2004: Allgemeine Didaktik und Neue Medien. Der Einfluss der Neuen Medien auf didaktische Theorie und Praxis. Klinkhardt, Heilbrunn.
- STROBL, J., 2004: OpenGIS und Schulunterricht Lernziele im Bereich Geo-Medien-Kompetenz. SCHÄFER, D. (Hrsg.), 2004: Geotechnologien und Geoinformation -Anwendungsbeispiele aus der modernen Informations- und Kommunikationsgesellschaft. Mainzer Geographische Studien. Mainz: 75-85.

# Konzeption für eine objektspezifische und fuzzy logic Veränderungsanalyse

### JOCHEN SCHIEWE

Zusammenfassung: Die Verwendung von objektspezifischen und fuzzy logic-Ansätzen ist inzwischen zu einem Standard im Rahmen der Klassifikation räumlich hoch auflösender Fernerkundungsszenen geworden. Dieser Beitrag propagiert die Anwendung solcher Verfahren auch für nachfolgende Veränderungsanalysen. Hierzu werden die Kernaufgaben der Zuordnung korrespondierender Objektflächen, die Abspaltung von Fehleranteilen sowie die Bestimmung von Kennwerten betrachtet. Schließlich wird gezeigt, dass ein bereits entwickeltes Unsicherheitsmaß für die Bestimmung der Klassifikationsgüte auch auf ein Veränderungsmaß übertragen werden kann.

# 1 Einleitung

Analysen zur Detektierung von Landschaftsveränderungen (*change detection*) stellen eine zentrale Aufgabe im Kontext der Auswertung von Fernerkundungs- und GIS-Datenbeständen dar. Zu diesem Zweck wird häufig ein Vergleich von Klassifikationsergebnissen durchgeführt und das Veränderungsverhalten in einer Matrix dokumentiert. Bei dieser Vorgehensweise gibt es aber eine Reihe von Problemen, die im Rahmen dieses Beitrages an Beispielen beschrieben und für die Lösungsansätze präsentiert werden sollen. Dieser Beitrag stellt eine Fortführung des Aufsatzes von SCHIEWE & GÄHLER (2006) dar, der die Bewertung von Klassifikationsergebnissen mit Hilfe eines objektspezifischen und fuzzy logic-Ansatzes verfolgte.

Ein zentrales Problem bei der Veränderungsanalyse liegt – insbesondere bei der Verwendung räumlich hoch auflösender Daten – im pixelweisen Vergleich der Datensätze. Aufgrund der kleineren Bodenpixelgrößen moderner Sensoren steigt die spektrale Varianz innerhalb der abgebildeten topographischen Objekte an, worauf mit der Verwendung von Segmentierungsmethoden reagiert werden kann. Konsequenterweise sollte nun auch der Vergleich von Klassifikationsergebnissen objektspezifisch erfolgen, um nicht Aussagen über die Veränderung einiger, nicht zusammenhängender Elemente (z.B. Randpixel) zu erhalten, sondern das Verhalten bestimmter, jedoch kompletter topographischer Objekte beschreiben zu können. Mit einem solchen objektspezifischen Vorgehen erhöht sich der Umfang thematischer und geometrischer Veränderungsparameter. Kapitel 2 wird die zugrunde liegende Notwendigkeit weiter motivieren und entsprechende Kennwerte beschreiben.

Ferner weisen die einzelnen Datengrundlagen räumliche und thematische Unschärfen auf, die schon während des Klassifizierungsschrittes eine eindeutige Zuordnung stark subjektiv machen. Daher wird oft ein fuzzy logic-Ansatz angewendet, der auch im Zuge der Veränderungsanalyse

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> apl. Prof. Dr.-Ing. Jochen Schiewe. Universität Osnabrück, Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, Seminarstr. 19a/b, 49069 Osnabrück, E-Mail: jschiewe@igf.uni-osnabrueck.de

konsequent fortgeführt werden und in einem (unscharfen) Veränderungsmaß münden sollte. Kapitel 3 skizziert das entsprechende Vorgehen.

# 2 Objektspezifische Veränderungsanalyse

#### 2.1 Notwendigkeit und bisherige Arbeiten

Konventionell basiert die Bewertung von Klassifikationsergebnissen – und damit auch von nachfolgenden Veränderungsanalysen – auf stichprobenartig gesammelten Kontrollpunkten, die entweder zufällig oder/und nach Klassen gewichtet verteilt werden. Analog zu den Interpretationsstrategien, die für hoch auflösende Fernerkundungsdaten in der Regel nicht mehr pixel- sondern objektbasiert vorgehen, sollte in diesem Kontext nun auch die Evaluation konsequenterweise objektspezifisch durchgeführt werden. Zum einen können somit einzelne Objekte, die von besonderem Interesse sind, individuell bewertet werden (siehe Abbildung 1). Zum anderen wird damit der Tatsache Rechnung getragen, dass es innerhalb einer Objektklasse - verteilt auf die gesamte Fernerkundungsszene – deutliche Varianzen in der Klassifikationsgüte geben kann, da auch die entsprechenden Szenenmerkmale und ihre Unsicherheiten variieren. Eine flächenhafte Betrachtung hat den Nebeneffekt, dass nicht nur thematische, sondern auch geometrische Parameter (z.B. Flächen- oder Formähnlichkeit) in die Bewertung einfließen können.



Abbildung 1: Prinzip der Berechnung eines Sicherheitsmaßes für alle Objekte einer ausgewählten Klasse (links) gegenüber der individuellen Berechnung jedes einzelnen Objektes (rechts)

ZHANG & GOODCHILD (2002, S. 191) stellen fest, dass bisher zu wenige Arbeiten im Hinblick auf die Unsicherheit in Objekten stattgefunden hat. CONGALTON & GREEN (1999) haben schon das Konzept eines cluster sampling, d.h. eine Verteilung auf zusammenhängende Bereiche, eingeführt. Dieser Ansatz basierte aber noch auf schwächer aufgelösten Daten, sodass auch eine Begrenzung auf 25 bis 50 Pixel pro Cluster gefordert wurde, damit nicht mehrere Objekte in einen Bereich fallen. Bei den modernen Auswerteverfahren entstehen – entweder durch Anwendung von Segmentierungsverfahren, oder durch Überlagerung von Polygonen aus vorhandenen GIS-Datenbeständen – nun aber hinreichend große homogene Cluster, die für ein objektspezifisches Vorgehen genutzt werden können (DUNGAN, 2002). Dennoch existieren bisher nur wenige Arbeiten zur Ableitung objekt-spezifischer Kenngrößen. Oft werden flächenhafte Bewertungen auf Pixel-zu-Pixel-Vergleiche aller Bildelemente innerhalb eines Polygons reduziert (siehe z.B. CURRAN & WILLIAMSON, 1988; APLIN et al., 1999). ZHANG et al. (2005) geben eine vertiefte Be-

handlung zur objekt-spezifischen Bewertung, die im nächsten Teilabschnitt aufgegriffen werden soll.

#### 2.2 Konzeptionelle Umsetzung

Abbildung 2 zeigt den konzeptionellen Ablauf einer objektspezifischen Veränderungsanalyse, deren grundsätzliche Idee darin besteht, dass nicht nur wenige Bestandteile (z.B. ein Pixel) eines Objektes. sondern das gesamte Objekt und seine Eigenschaften (z.B. ein Gebäude inklusive der Eigenschaften Flächengröße oder Form) durch einen aussagekräftigen Parametersatz bewertet und nachfolgend mit dem Parametersatz eines zweiten Zeitpunktes verglichen werden soll. Das Ergebnis der Veränderungsanalyse wird in der Regel in Form einer Veränderungsmatrix (change matrix) dargestellt. Im Folgenden werden die kritischen Elemente dieses Ablaufes -Zuordnung der Objektregionen, Abspaltung von Klassifikationsfehlern und Ableitung von Kennwerten - im Detail behandelt.

Ein Grundproblem beim Vergleich besteht in der **Zuordnung der klassifizierten Re**gionen zwischen den jeweiligen Zeitpunk-



Abbildung 2: Schematischer Ablauf einer objektspezifischen Veränderungsanalyse

ten. ZHANG et al. (2005) schlagen als Kriterium eine Überlappung von 50% bei einer minimalen Überlappungsfläche von 10 Pixel (entsprechend 10 m<sup>2</sup>) vor. Für detaillierte Betrachtungen erscheint es angebracht, die Zuordnung nach Überlappungsfläche (z.B. > 50%, > 60%, usw.) zu gruppieren. Eine gröbere Klassifizierung schlagen SCHÖPFER & LANG (2006) vor, die bestimmen, ob ein Objekt zum zweiten Zeitpunkt vollständig im definierten Pufferbereich enthalten ist, sich ausgedehnt hat oder ob andere Objekte in den Puffer eindringen. Die jeweilige Häufigkeit dieser Fälle wird gezählt und durch zwei Indizes ("object loyalty" bzw. "interference") zusammengefasst. Zur Umsetzung dieser Zuordnung sind generell Puffer-Operationen anzuwenden (siehe auch SCHÖPFER & LANG, 2006). Dieses Konzept kann auf Basis der früher bereits definierten klassen- oder objektspezifischen Pufferbreiten (siehe SCHIEWE & GÄHLER, 2006) weiter verfeinert werden.

Sensitivitätsanalysen von PONTIUS & LIPPITT (2006) zeigen, dass bei einer Klassifikationsgüte von 91% in den Vergleichsdatensätzen die Hälfte der erkannten Veränderungen auf Fehler und nicht auf tatsächliche Veränderungen zurückzuführen sind. Bei der Anpassung der bisher entwickelten Methodik auf die Aufgabenstellung der Veränderungsanalyse müssen daher Regeln zur Abspaltung von Fehlern festgelegt und vorab angewendet werden:

- Eine gängige Methode im Kontext der Fuzzy logic-Theorie (siehe Kapitel 3) stellt die Verwendung von so genannten α-cuts (d.h. Schwellwerten für Zugehörigkeitsangaben) dar. Hiermit wird festgelegt, ab welcher Änderung eines Zugehörigkeitswertes (für ein Pixel, für ein Objekt) von einer tatsächlichen Veränderung ausgegangen werden kann bzw. bis wann es sich um eine zufallsbedingte Variation der Merkmale oder um einen möglichen Fehler handelt. Die möglichst datengetriebene Herleitung dieser Schwellwerte wird zu untersuchen sein.
- Alternativ kann z.B. der Ansatz von PONTIUS & LIPPITT (2006) verwendet und angepasst werden, der bei erkannten Veränderungen den Anteil von tatsächlichen Fehlern in Referenz und Klassifikationsergebnis (real bekannt oder als Nutzergenauigkeit angenommen) abschätzt.

Für die zugeordneten Regionen müssen nun **Kennwerte** abgeleitet werden, die miteinander verglichen werden sollen. Hierzu bieten die Arbeiten von ZHANG et al. (2005) eine wertvolle Grundlage. Die Autoren definieren pixel- sowie objektbasierte Qualitätsmaße zur objektspezifischen Bewertung von Klassifikationsergebnissen durch einen Vergleich von Referenz und Klassifikation. Diese Maße werden im Folgenden aufgegriffen und auf den Fall eines objektspezifischen Vergleiches von Klassifikationsergebnissen für zwei Zeitpunkte übertragen:

- Als Maß f
  ür die Gesamtgenauigkeit dient der Anteil der zugeordneten Objekte in Relation zur Gesamtanzahl aller Objekte zu beiden Klassifikationszeitpunkten. Dieses Maß kann auch klassenspezifisch berechnet werden.
- Ein aussagekräftiges geometrisches Maß ist die Größenähnlichkeit von korrespondierenden Objekten zu den beiden Zeitpunkten. Hierzu wird die kleinere Fläche der beiden Objekte durch die größere Fläche dividiert. Je größer das Maß (mit dem Maximalwert 1) ist, desto größenähnlicher sind sich die Objekte.
- Ein anderes geometrisches Maß befasst sich mit der Veränderung der *Position* von Objekten zwischen den beiden Zeitpunkten. Hierzu wird die Euklidische Distanz zwischen den Schwerpunkten der Objekte zu beiden Zeitpunkten eingeführt.

In Ergänzung wird hier vorgeschlagen, noch einen Parameter zur Beschreibung der *Formähnlichkeit* in das Gesamtkonzept zu integrieren. Hierzu können die Kompaktheiten (abgeleitet aus Umfang und Fläche) der korrespondierenden Objekte berechnet und durch Division des kleineren Wertes durch den größeren Wert in ein Ähnlichkeitsmaß überführt werden.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass die Definitionen von ZHANG et al. (2005) auf den Annahmen beruhen, dass scharfe Objektgrenzen und fehlerfreie Referenzdaten vorliegen. Dieser Aspekt wird in Kapitel 3 aufgegriffen werden.

# 3 Fuzzy-logic Veränderungsanalyse

## 3.1 Notwendigkeit

Die Bewertung von Klassifikationsergebnissen eines oder mehrerer Zeitpunkte erfolgt klassischer Weise mittels eines wahrscheinlichkeitsbasierter Ansatzes. Dies ist streng genommen aber nur dann sinnvoll, wenn ausschließlich bzw. hauptsächlich zufällige Variationen in den Zuweisungen vorliegen. Sobald die Kategorisierung aus einer Reihe von Gründen allerdings nur vage erfolgen kann, fehlt die theoretische Basis für diesen Ansatz (ZHANG & GOODCHILD, 2002). Zu diesen Gründen, die bei Verwendung moderner Sensoren noch verstärkt auftreten, gehören:

- Im Verlauf der Interpretation gehen die Regeln zur Zuordnung eines Bildobjekts zu einer vorgegebenen Klasse in aller Regel von diskreten Grenzen zwischen den Klassen aus. In hoch auflösenden Daten entstehen aber größere Regionen (bzw. eine höhere Anzahl von Pixel) unscharfer Übergangsbereiche zwischen Klassen (z.B. am Waldrand), die eine eindeutige Zuordnung unmöglich bzw. stark subjektiv machen. Solche unscharfen Übergangsbereiche können ihre Ursachen sowohl in limitierten Positionsgenauigkeiten, als auch semantisch schlecht definierbaren Grenzen haben. CHRISMANN (1982) hat in einer empirischen Studie gezeigt, dass 18% der Landoberfläche eines Testgebietes in so genannten ε-Bändern liegt, in denen keine eindeutige thematische Zuweisung zu genau einer Objektklasse möglich ist.
- Eine Kategorisierung von inhärent komplexen räumlichen Phänomenen in diskrete Klassen ist stark verknüpft mit einer Anwendungsabhängigkeit und Subjektivität bei der Klassenbeschreibung (ZHANG & GOODCHILD, 2002). Es entstehen vage Kategorien (z.B. die Einteilung in "Stadt" vs. "Vorort"). Mit modernen Sensoren soll und kann eine stärkere thematische Tiefe erzielt werden, sodass dieser Effekt der vagueness verstärkt auftritt.
- Der Unschärfe-Effekt bei Verwendung moderner Sensoren wird auch dadurch verstärkt, dass aufgrund der kleineren Bodenpixelgrößen die spektrale Varianz innerhalb von Regionen ansteigt, die jeweils ein topographisches Objekt repräsentieren. Dies führt zu einer höheren Anzahl von Mischelementen (z.B. besteht Wald aus Bäumen, Offenboden u.a.). WANG (1990) macht deutlich, dass die Einführung zusätzlicher (Misch-)Klassen das Unschärfeproblem nicht grundsätzlich lösen kann, da nicht nur ein größerer Prozessierungsaufwand anfällt, sondern oft auch neue, von Endnutzern schwer nutzbare Klassen entstehen. Ferner implizieren zusätzliche Mischklassen auch eine Überlappung von Merkmalen und somit potenzielle Fehlinterpretationen.
- Schließlich ist grundsätzlich noch festzuhalten, dass die beobachteten Daten oft f
  ür eine eindeutige Zuweisung zu den definierten Kategorien nicht geeignet sind (ZHANG & GOODCHILD, 2002).

Aus diesen Gründen macht es Sinn, sich neben wahrscheinlichkeitsbasierten Ansätzen gerade bei Verwendung räumlich hoch auflösender Fernerkundungsdaten mit Ansätzen zur Modellierung von Unschärfen bzw. Übergangsregionen zu beschäftigen. Hierzu bietet sich u.a. die fuzzy logic-Theorie an. Das Konzept der variierenden Zugehörigkeiten zu einer Klasse (von "gar keine" bis "volle" Zugehörigkeit) und ihre Anwendbarkeit auf Klassifikationsaufgaben demonstriert z.B. FISHER (2000). Auch WANG (1990) rechtfertigt die Anwendung und schlägt die Ableitung einer

*fuzzy partition matrix* vor, die den Zugehörigkeitswert eines Merkmalsträgers zu jeder einzelnen Klasse beinhaltet. Durch Einführung von Schwellwerten können nun auch eine Unterscheidung zwischen "homogenen" und gemischten Bildelementen sowie die Bestimmung der Anteile der Landbedeckungs-Komponenten erfolgen.

EDWARDS & LOWELL (1996) definieren eine Zugehörigkeitsfunktion zur Beschreibung räumlicher Unsicherheiten. Hierzu werden für alle Paare von Objektklassen ("*twains*") jeweils "fuzzy Breiten" eingeführt, indem die zufälligen, mittleren Abweichungen aus mehrfachen Digitalisierungen in den Luftbildern bestimmt werden. Dabei wird festgestellt, dass nicht nur die thematische Zugehörigkeit, sondern auch die Größe der betrachteten Polygone einen Einfluss auf die Grenzunschärfe besitzt (je kleiner die Fläche, desto unschärfer). Dieser Ansatz wurde in einer unserer früherer Arbeiten (SCHIEWE & GÄHLER, 2006) aufgegriffen und soll im Folgenden auf die Aufgabe der Veränderungsanalyse übertragen werden.

#### 3.2 Konzeptionelle Umsetzung

Im Allgemeinfall kann davon ausgegangen werden, dass für beide (oder weitere) Zeitpunkte Klassifikationsergebnisse existieren, die Unsicherheiten bzw. Unschärfen aufweisen. Wie bereits in Abschnitt 2.2 beschrieben wurde, bestimmen SCHÖPFER & LANG (2006), ob ein Objekt zum zweiten Zeitpunkt vollständig im definierten Pufferbereich enthalten ist, sich ausgedehnt hat oder ob andere Objekte in den Puffer eindringen. Die jeweilige Häufigkeit dieser Fälle wird gezählt und durch Indizes beschrieben.

Wir verfeinern diese Idee durch Einführung eines fuzzy logic-Veränderungsmaßes (Object specific Fuzzy Alteration Measure, OFAM), das analog zum Unsicherheitsmaß (vergleiche SCHIEWE & GÄHLER, 2006) gebildet wird: Für alle Elemente der zugeordneten Regionen zu beiden Zeitpunkten wird das Zugehörigkeitsmaß zu allen Klassen sowie der Betrag der jeweiligen Differenz gebildet. Hiermit wird erneut eine scharfe und ggfs. falsche Bewertung einer Veränderung vermieden. Abbildung 3 demonstriert die zugrunde liegende Idee des Veränderungsmaßes sowie die resultierende Formel.

Schließlich werden die Ergebnisse der Veränderungsanalyse in Form einer Veränderungsmatrix, in diesem Fall in einer *fuzzy change detection matrix*, zusammenfassend dargestellt.



Abbildung 3: Schema zur Bestimmung des objektspezifischen, fuzzy-logic Veränderungsmaßes

# 4 Zusammenfassung & Schlussfolgerungen

Aus einer Reihe von Gründen werden für die Klassifikation räumlich hoch auflösender Daten und teilweise auch schon für die Bewertung dieser Klassifikation objektspezifische und fuzzy logic-Ansätze verwendet. Konsequenterweise sollte solche Verfahren auch für nachfolgende Veränderungsanalysen angewendet werden. Dieser Artikel hat die jeweiligen Notwendigkeiten zusammenfassend dargestellt sowie vorhandene und eigene Lösungsansätze demonstriert.

Die Kernaufgaben bei der eines objektspezifischen Vorgehensweise bestehen in der Zuordnung korrespondierender Objektflächen, die i.d.R. durch Schwellwertoperationen gelöst wird, sowie der Ableitung von Kennwerten. Hierbei kann ein umfangreicher Parametersatz bestimmt werden, der nicht nur thematische Aspekte (d.h. die Zuordnung zu den gegebenen Klassen), sondern auch geometrische Maße (z.B. Größen- oder Formähnlichkeit sowie Abweichung der Schwerpunkt-Position) beinhaltet. Im Hinblick auf die Berücksichtigung von inhärenten und nicht vermeidbaren thematischen und geometrischen Unschärfen propagieren wir die Übertragung eines bereits entwickelten Unsicherheitsmaßes für die Bestimmung der Klassifikationsgüte auf ein objektspezifischen, fuzzy logic Veränderungsmaß (OFAM), das auf dem Betrag der Differenz der Zugehörigkeitswerte für alle Elemente der zugeordneten Regionen basiert.

Eine künftige Erweiterung des bisher skizzierten Ansatzes besteht in der Anwendung des Prinzips auf Veränderungsanalysen für mehr als zwei Zeitpunkte. Hier wird u.a. zu untersuchen sein, ob der erweiterte Informationsumfang eine zuverlässigere Ableitung von Schwellwerten nach sich ziehen kann.

Abschließend ist festzuhalten, dass die hier skizzierte Erweiterung der Methodik zur Veränderungsanalyse einerseits zu einem umfassenderen und aussagekräftigeren Ergebnis führen kann, andererseits aber auch einen signifikanten Anstieg von Auswerteaufwand und Ergebniskomplexität verursacht, was die Automatisierbarkeit deutlich erschwert. Aus diesem Grund propagieren wir eine Kombination aus einer numerischen Analyse und verbesserten visuellen Auswertemethoden, wobei die Methoden und Werkzeuge der Geovisualisierung Erfolg versprechende Lösungsansätze darstellen.

# 5 Literaturverzeichnis

- APLIN, P., ATKINSON, P.M. & CURRAN, P.J. (1999): Fine spatial resolution simulated sensor imagery for land cover mapping in the United Kingdom. Remote Sensing of Environment. 68: 206-216.
- CHRISMANN, N.R. (1982): A Theory of Cartographic Error and Its Measurement in Digital Databases. AUTOCARTO, (5): 159-168.
- CONGALTON, R. AND K. GREEN (1999): Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices. CRC/Lewis Press, Boca Raton, FL. 137 p.
- CURRAN, P.J. & WILLIAMSON, H.D. (1988): Selecting a spatial resolution for estimation of perfield green leaf area index. International Journal of Remote Sensing, 9: 1243-1250.
- DUNGAN, J.L. (2002): Toward a comprehensive view of uncertainty in remote sensing analysis. In: Foody, G.M. & Atkinson, P.M. (Eds.): Uncertainty in Remote Sensing and GIS. Wiley, 25-35.
- EDWARDS, G. & LOWELL, K.E. (1996): Modeling Uncertainty in Photointerpreted Boundaries. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 62(4): 337-391.
- FISHER, P. (2000): Sorites paradox and vague geographies. Fuzzy Sets and Systems, (113): 7-18.
- PONTIUS, R.G. & LIPPITT, C.D. (2006): Can Error Explain Map Differences Over Time? Cartography and Geographic Information Science. 33(2): 159-171.
- SCHIEWE, J. & GÄHLER, M. (2006): Modelling uncertainty in high resolution remotely sensed scenes using a fuzzy logic approach. 1st International Conference on Object-based Image Analysis, Salzburg (CD-ROM).
- SCHÖPFER, E. & LANG, S. (2006): Object fate analysis a virtual overlay method for the categorisation of object transition and object-based accuracy assessment. Proceedings der 1<sup>st</sup> International Conference on Object-based Image Analysis (OBIA), CD-ROM.
- WANG, F. (1990): Improving Remote Sensing Image Analysis through Fuzzy Information Representation. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 56(8): 1163-1169.
- ZHANG, J. & GOODCHILD, M. (2002): Uncertainty in Geographical Information. Taylor & Francis, 266 S.
- ZHANG, Q., MOLENAAR, M, TEMPFLI, K. & SHI, W. (2005): Quality assessment for geo-spatial objects derived from remotely sensed data. International Journal of Remote Sensing, 26(14): 2953-2974.

# Reconstruction of Architectural Objects from 3D scanner survey

# CHRISTOPHE CRUZ<sup>1</sup> & FRANK BOOCHS<sup>2</sup>

Abstract: This paper presents a method that aims at reconstructing a 3D building from point clouds measured by 3D scanner. It starts from the idea that it is easier to rebuild a scene using available knowledge about the scene's elements. This solution has to consider the three following aspects. How to find objects in a cloud of points? How to define a geometric and semantic coarse model? Which algorithms to use as a propagation method to find all objects in the cloud of points? In our solution the user has to assign the context by defining a coarse model of the building to be reconstructed. Then the user interactively selects a set of points in the cloud that represents an element. The selection is also mapped to the coarse model by assigning the corresponding wall in the "CM". Then the user starts the reconstruction algorithm. Within an iterative process the plane representing the wall is found and will be used to correct the model. The process starts with the mapped plane, corrects it, and continues with information in "CM" to detect an adjacent plane by propagation.

## 1 Introduction

In the field of civil engineering projects it is often difficult to update a building. Most of the time, information concerning its design has simply disappeared. Indeed, no process was usually defined to store digital data concerning the design of the architectural project. Such data would be helpful to estimate the update costs. For instance, the security laws evolve and the buildings have to follow them. Consequently, the buildings must be updated too. Also, the building has to be captured "as-built" using expensive geometrical measurements to improve the design and to evaluate the update costs. These measurements have to be done by engineers and comprise several steps like the establishment of a geometrical reference and a local data capture. This process is time consuming, that's why automatic algorithms are welcome in order to reduce time and cost. In principle, photogrammetry and laser scanning both have the potential for improvements and higher degrees of automatism. In this article we focus on a method based on the laser scanning survey.

Digital building plans being defined by the civil engineers with the help of CAD software mostly contain simple geometries. During various processing steps and their inevitable data exchange object information is reduced to a set of vectors using formats like DXF or DWG. As a consequence, semantic information and object structures are lost. Such problems might be avoided with file formats like IFC, defined by the International Alliance for Interoperability. This standard associates a semantic definition to geometrical elements in the field of building projects. Up to now, this standard is used as an exchange format by international leaders of CAD

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Christophe CRUZ: Laboratoire Le2i, UFR Sciences et Techniques, Université de Bourgogne, B.P. \_ 47870, 21078 Dijon Cedex, France, christophe.cruz@u-bourgogne.fr

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Frank BOOCHS: Institut i3mainz, am Fachbereich 1 - Geoinformatik und Vermessung, Fachhochschule Mainz, Holzstrasse 3655116 Mainz, boochs@geoinform.fh-mainz.de

software. This format is of value for "as-built" problems, aiming at the digital reconstruction of real buildings. Consequently, it should be helpful to use the IFC semantic information directly during an "as-built" reconstruction of a building for an automatic reconstruction. In this article we focus on a method based on a 3D laser scanner and on IFC semantic definitions. These definitions are stored in an ontology which defines the semantic information of the architectural context to improve the reconstruction process.

The following section gives background information on projects that aim to reconstruct a 3D model of a building from survey data. In these projects the semantic information that describes the context of the building takes an important place. Section 3 describes our approach inspired from these projects. Section 4 focuses on this method by explaining all the important parts of the reconstruction process.

# 2 Background

Today, computer-driven evaluation of spatial data sets is limited by the complexity of the objects to be extracted. As a matter of fact, it is complicated and time consuming to formulate rules in order to detect and extract objects geometrically correct. It is due to one essential reason that the objects are broken down into many small geometrical pieces. Even if each piece can be treated in an isolated way, it is not possible to treat all data at one time. Therefore, the use of knowledge and its introduction into the process of evaluation is promising for global interrelations. The impact of semantic information on the reconstruction process depends on the structure of the raw data that has to be handled. Therefore, it is necessary to study those structures and reconstruction processes. A short survey is given in the two following subsections. The first subsection is concerned with reconstruction methods based on photogrammetric data and the second considers reconstruction methods based on scanning data. Each method has its own characteristics and advantages but the best choice depends on the material available, the object to be captured, the required precision, and the time available (GRÜN, 2002), (BRYAN, 1999), (BALLETTI, 2004), (BOEHLER, 2004).

## 2.1 Photogrammetry

Reconstruction methods based on photogrammetric data are of two kinds. The semi-automatic methods consist of the interaction with the user during the whole process. The automatic methods consist in the initiation of the process by the user at the beginning so that later the process runs without user interaction. Semi-automatic reconstruction methods can be found in the projects: Realise (ZITOVA, 2003), TotalCalib (ROBERT, 1995), (BOUGNOUX, 1997), (FAUGERAS, 1997), Marina (CANTZLER, 2002), (NÜCHTER, 2003) and Rekon (FRASSON, 1999), (LOSCOS, 1999), (POULIN, 1998). Automatic reconstruction methods have been developed by POLLEFEYS et al. (POLLEFEYS, 2000) and ZISSERMAN et al. (WERNER, 2002). They use the projective geometry on non-calibrated images. Pollefeys' system combines various algorithms from computer vision, like projective reconstruction, auto-calibration and depth map estimation. Of special interest for our work was the project Aida (WEIK, 1996) because it uses a semantic network to guide the reconstruction. This method opens a new way by using semantic

information. The automatic reconstruction remains a difficult task in spite of many years of research (BACKER, 1981), (FLEET, 1991), (GRIMSON, 1981), (JONES, 1992), (MARR, 1979), (MCMILLAN, 1995). The major problems are the impact of the viewpoint onto the appearance of the object in the image. This is due to the changes with respect to geometry, radiometry, occlusions and the lack of texture. Strong variations of the viewpoint may destroy the adjacency relations of points, especially when the object surface shows considerable geometrical variations. This dissimilarity causes confusion in the determination of correspondence and it is worse when partial occlusions result in a disappearance of object parts. In cases of weak texture the algorithms do not have sufficient information to solve the correspondence problem correctly. Usually, this is the reason why the reconstruction fails.

## 2.2 3D Scanning

Accurate reconstruction of a surface model from unorganized points of clouds provided by scanning systems are complex and are still not completely solved. Problems arise from the fact that the points are generally not organized, contain noise and do not reflect directly the object characteristics, for example. Computer-based processes of object extraction are therefore limited in their efficiency. F. Remonido gives a good overview of existing algorithms (REMONDINO, 2003). Close attention is given to the work of Cantzler et al. (CANTZLER, 2002) and to the work of Nüchter et al. (NÜCHTER, 2003) because these projects use semantic information. Planes which are being reconstructed are associated to a semantic interpretation which has to fit to a network model (GRAU, 1997). A tree of "backtracking" allows to find the best mapping between the scene interpretation and the semantic network model. A coherent labelling exists if all surfaces are labelled.

Compared to photogrammetry, problems seem to be fewer in the field of scanning but an automatic reconstruction is just as impossible as it is within image based techniques. One important reason for this is the complexity of objects in combination with redundancy, incompleteness and noise within the clouds of points. Improvements can be expected when knowledge about the scene is used, as is shown in the work of CANTZLER and NÜCHTER. This is the reason why the nature of the geometrical objects and the existing constraints between them make it possible to support computer based detection.

# 3 Ontology-driven reconstruction

As the work presented in the previous section shows, a semantic context may support considerably a 3D reconstruction. This might be helpful for the reconstruction within clouds of points where some elements of the object have already been detected and need to be combined to a final structure. Semantic knowledge is also useful for photogrammetric tasks. This might either help to group 2D points in the images or to form the spatial structure when several images are available. The semantic structure of the spatial object model is the same, only the use and the interaction with the data are different. In the following section our vision of the use of semantic definition for 3D reconstruction will be sketched. Our main idea is founded on the duality between context and constraints. It starts from the idea that it is easier to rebuild a scene using

available knowledge about the scene's elements. Therefore, in order to define the knowledge about the context, a coarse geometrical and semantic model has to be established. We call this Coarse Model "CM" and it is a spatial structure that defines a building and the semantics about the elements that compose the building.



Fig. 1: Example of an architectural CM

The "CM" (e.g. fig. 1) defines the rough geometry and the semantics of the building without any real measurement. Such a "CM" will then be updated by means of real measurements representing the building. In order to achieve this, knowledge has to represent the real world by reflecting entities and relations between them. Therefore, knowledge constitutes a model of the world and agents use their knowledge as a model of the world. In addition, to model the semantics of knowledge as well as the structure where this knowledge is stored, it is necessary to reach a higher conceptual level. For that, knowledge representation is independent of knowledge use. Thus, knowledge representation and inferential mechanisms are dissociated (GUARINO at al., 1994). On the other hand, domain conceptualization can be performed without ambiguity only if a context of use can be given. In fact, a word or a term can designate two different concepts depending on the particular context of use (BACHIMONT, 2000). The semantic of knowledge is strongly constrained by the symbolic representation of computers. Therefore N. Guarino (GUARINO, 1994) introduced an ontological level between the conceptual level and the epistemological level. The ontological level forms a bridge between interpretative semantics in which users interpret terms and operational semantics in which computers handle symbols (DECHILLY, 2000). Some projects presented previously have used a semantic network to model the semantics of a scene. We will use an ontology as a meta-data diagram. The role of a metadata diagram is double (AMANN, 2003). On the one hand, it represents the knowledge shared on a domain. On the other hand, it plays the role of a database schema which is used for the formulation of requests structured on meta-data or to constitute views. In addition, the ontologies allow to dissociate knowledge representation and inferential mechanisms. We have sketched a generic definition of semantic elements that permit to dynamically add new elements in the ontology without changing the code. Those new elements are also taken automatically into account in the storing process and the inferential mechanisms. Finally, once the "CM" has been corrected, geometric and semantic information in the ontology can be exported into an IFC file format. So, the 3D model can be used directly in civil engineering processes and CAD software.

### 4 Method Definition

Our method aims at developing a solution to reconstruct automatically a 3D building from a point cloud measured by a 3D scanner. This solution (Fig. 2) has to consider the three following aspects. How to define a geometric and semantic coarse model? How to find objects in a cloud of points? Which algorithms to use as a propagation method to find all objects in the cloud of points? In our solution the user has to assign the context by defining a coarse model of the building to be reconstructed. Then the user interactively selects a set of points in the cloud that represents a wall. The selection is also mapped to the coarse model by assigning the corresponding wall in the "CM" (Fig. 3). Then the user starts the reconstruction algorithm. Within an iterative process the plane representing the wall is found and will be used to correct the model. The process starts with the mapped plane, corrects it, and continues with information in "CM" to detect an adjacent plane by propagation. A final stage should aim at the detection of smaller parts like doors, windows, etc.



Fig. 2: global view of our method

The three following points give an overview of our solution to achieve the final goal consisting of the definition of a "CM", the plane detection that allows to find objects in the cloud of point, the search of objects by propagation permitting the correction of the "CM".

• With the application that has been developed (Fig. 3) the user can define geometrical elements of a building like the position and the size. Moreover, the interaction with our application allows to define automatically constraints between elements of the "CM" which are described by the architectural ontology. For instance, a window is a concept that composes the architectural ontology. This window has a constraint which is "the window must be in a wall with a bigger size". Our model is divided into two levels which are the semantic level and the instance level. The semantic level allows to store the description of the ontology classes from a OWL (Web Ontology Language) file. The instance level allows to store the description of the instances from the classes of the ontology. The storing process and the graphical interface are then not modified when a new class has to be added. In addition, we defined predefined behaviors and then

associate those behaviors of the future elements to the existing behaviors. For example, a new class column has the same behavior as a wall. It is indeed located on the ground and touches the ceiling. Thus, it was necessary to locate the types of behavior according to the possible interactions.



Fig. 3: On the left, there is a snapshot of the application allowing the selection of a subcloud of points. On the right, there is a snapshot of the application allowing the definition of the "CM".

- The objects which we look for in the point cloud are planes. This geometric primitive is the easiest one to search and also the fastest one (REMONDINO, 2003). During the plane search process, there are several stages that have to be carried out. The first stage is the partitioning of the point cloud. After initial planes are found, they have to be extended within the point cloud. This is achieved by starting from the plane equation for one voxel and looking at the adjacent voxels if there are points possibly belonging to the same planar surface part. There are several methods to support such a decision. One solution is to calculate a plane for each voxel by means of "least square adjustement". This is relatively simple to set up, but needs to define a threshold for the different angle of orientation to define the similarity. A better solution starts with the voxel having the best residual error and then it consists in checking the distance to this plane, beginning with the direct neighbours. If the sum of the distance is lower than a certain threshold then the voxels are fused. For the fused group a new equation has to be calculated in order to refine the result.
- The principle of the project is to use a point cloud coming from a building survey to correct a coarse model that defines the context. Although the improvement of the coarse model is the most interesting result, the initial model and the knowledge contained therein is of basic importance for the update process. Therefore, two aspects are of interest in the context of model improvement: first, readjusting the initial wall definition compared to the "CM", and, secondly, the support for the propagation of the plane detection in the whole cloud of points. To propagate the "CM" modification a direction was defined. The propagation is made left towards right then bottom towards top. The "CM" contains information of the neighbourhood. Indeed, the neighbourhood relations are automatically defined during the "CM" definition.

## 5 Conclusion

This paper presented briefly our solution for the 3D reconstruction driven by an architectural ontology. At this time, most of the huge issues were resolved and the complete process was prototyped. The following issue to be resolved is the use of the other primitives like the cylinder to reconstruct automatically more complex scenes. Furthermore, we are also working on a solution to reuse a partial "CM" that allows to define more easily a complex "CM".

## 6 References

- AMANN, B., 2003. Du Partage centralisé de ressources Web centralisées à l'échange de documents intensionnels, Documents de Synthèse.
- BACHIMONT, B., 2000. Engagement sémantique et engagement ontologique : conception et réalisation d'ontologie en ingénierie des connaissances, In Charlet J., Zackland M., Kessel G. & Bourigault D., eds., Ingénierie des connaissances : évolution récentes et nouveaux défis, Eyrolles, pages 305-323.
- BACKER, H. H. & BINFORD, T. O., 1981. Depth from edge and intensity based stereo. In Proceedinds of the seventh IJCAI, Vancouver, BC, pages 631-636.
- BALLETTI, C. & MANDER, S., 2004. Contemporary Master's Architecture: New Architectural Heritage, Approaches For Surveying and Representation, Geo-Imagery Bridging Continents, XXth ISPRS Congress, 12-23 July, Istanbul, Turkey.
- BOEHLER, W. et al., 2004. The potential of non-contact close range laser scanners for cultural heritage recording, Actes du XVIII Symposium International CIPA, Postdam, Allemagne.
- BOUGNOUX, S. & ROBERT, L., 1997, TotalCalib: a fast and reliable system for off-line calibration of images sequences., In Proceedings of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, The Demo Session.
- BRYAN, P.G., CORNER, I. & STEVENS, D., 1999. Digital Rectification Techniques for Architectural and Archaeological, Photogrammetric Record, 16(93): 399-415, April.
- CANTZLER, H., FISHER, R. B. & DEVY, M., 2002. Quality enhancement of reconstructed 3D models using coplanarity and constraints, Proc. Annual German Symposium for Pattern Recognition (DAGM02, Zurich), pp 34-41.
- DECHILLY, T. & BACHIMONT, B., 2000. Une ontologie pour éditer des schémas de description audiovisuels, extension pour l'inférence sur les descriptions, In Actes des journées francophones d'Ingénierie des Connaissances (IC'2000).
- FAUGERAS, O., LAVEAU, S., ROBERT, L., CSURKA, G., ZELLER, C., GAUCLIN, C. & ZOGHLAMI, I., 1997. 3-d reconstruction of urban scenes from image sequences., CVGIP : Image Understanding.
- FLEET, D. J., JEPSON, A. D. & JENKIN, M. R. M., 1991. Phase-Based Disparity measurement., CVGIP : Image Understanding, 53(2):198-210.
- FRASSON, M., 1999. Reconstruction interactive de scènes tridimensionnelles à partir d'images, M.Sc. Thesis, March.
- GRAU, O., 1997. A Scene Analysis System for the Generation of 3-D Models, 3dim, p. 221, First.

GRIMSON, W. E. L., 1981. From Images to Surfaces., MIT Press.

- GRÜN, A., BÄR, S. & BEUTNER, S., 2002. Signals in the Sand 3D Recording and Visualization of the Nasca Geoglyphs, PFG (Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation), No. 6/2000. pp. 385-398.
- GUARINO, N., 1994, The ontological level, in R. Casati B. S. & White G., eds, Philosophy and the cognitive sciences, Hölder-Pichler-Tempsky.
- GUARINO, N., CARRARA, C., GIARETT, A P., 1994. An ontologie of meta-level categories, in J. Doyle F. S & Torano P., eds., Principles of Knowledge representation and Reasonning, Morgan-Kauffman, pages 270-280.
- HUOT, S. & COLIN, C., 2002. MArINa : reconstruction de bâtiments 3D à partir d'images., Colloque Modélisation Multimodale appliquée à la reconstruction d'environnements architecturaux et urbains, Bordeaux, France.
- JONES, D. & MALIK, J., 1992. Computational Framework for determining stereo correspondence from a set of linear spatial filters., Image and Vision Computing, 10(10):699-708, December.
- KUZO, P. M., 1999. Des contraintes projectives en modélisation tridimensionnelle interactive, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Nantes – Université de Nantes, novembre.
- LOSCOS, C., FRASSON, M., DRETTAKIS, G., WALTER, B., GRANIER, X. & POULIN, P., 1999. Interactive Virtual Relighting and Remodeling of Real Scenes, Proc. Eurographics Workshop on Rendering 99, June.
- MARR, D. & POGGIO, T., 1979. A computational theory of human stereo vision. Proceedings of the Royal Society of London, 204:301-328.
- MCMILLAN, L. & BISHOP, G., 1995. Plenoptic modeling : An image-based rendering system., In SIGGRAPH '95.
- NÜCHTER, A., SURMANN, H. & HERTZBERG, J., 2003. Automatic Model Refinement for 3D Reconstruction with Mobile Robots, Fraunhofer Institute for Autonomous Intelligent Systems (AIS) Schloss Birlinghoven, D-53754 Sankt Augustin, Germany.
- POLLEFEYS, M., KOCH, R., VERGAUWEN, M. & VAN GOOL. L., 2000. Automated reconstruction of 3D scenes from sequences of images, ISPRS Journal Of Photogrammetry And Remote Sensing (55)4, pp. 251-267.
- POULIN, P., OUIMET, M. & FRASSON, M., 1998. Interactively Modeling with Photogrammetry, Proc. Eurographics Workshop on Rendering 98, June.
- REMONDINO, F., 2003. From point cloud to surface: the modeling and visualization problem, Proc. Int. Worksh. Visualization and Animation of Reality-Based 3D Models, Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXIV-5/W10, Feb.
- ROBERT, L., 1995. Camera calibration without feature extraction, Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 63(2):314–325, March also INRIA Technical Report 2204.
- WEIK, S. & GRAU, O., 1996. Recovering 3-D Object Geometry using a Generic Constraint Description. In ISPRS96 - 18th Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, July, Vienne.
- WERNER, T. & ZISSERMAN, A., 2002. New Techniques for Automated Architecture Reconstruction from Photographs, Proc. 7th European Conference on Computer Vision, Copenhagen, Denmark.
- ZITOVA, B. & FLUSSER, J., 2003. Image registration methods: A survey, Image and Vision, Computing 21, 977–1000.

# Der Österreichische Ansatz für Aufbau und Aktualisierung des Objektbereichs Bodenbedeckung im Digitalen Landschaftsmodell

## CHRISTINE RIES, MICHAEL FRANZEN<sup>1</sup>, KLAUS STEINNOCHER<sup>2</sup> & FLORIAN KRESSLER<sup>3</sup>

Zusammenfassung: Durch den Zwang zur Kostenreduktion in der öffentlichen Verwaltung werden immer wieder Möglichkeiten gesucht, Datenbestände zu konsolidieren. Im Geoinformationsbereich ist es die Bodenbedeckung, welche historisch gewachsen sowohl im Kataster als auch in topographischen Karten geführt wird. Diese soll zu einer universellen Datenebene zusammengefasst und regelmäßig aktualisiert werden. Dazu wurden die Ergebnisse aktueller Projekte aufgegriffen und an die österreichischen Verhältnisse bestmöglich angepasst. Aus digitalen Orthophotos werden Indikatoren generiert, die einerseits auf bestimmte Ausprägungen der Bodenbedeckung hinweisen, andererseits durch Vergleich mit dem Altbestand mögliche Veränderungen in unterschiedlichen Plausibilitätsstufen aufzeigen. Eine daraus abgeleitete Indikatorenkarte soll den Sachbearbeiter bei seiner Erhebungstätigkeit bestmöglich unterstützen und den Gesamtprozess erheblich beschleunigen. Besondere Bedeutung kommt der Vollständigkeit der Ergebnisse zu, die durch Einsatz von objektorientierter Bildanalyse deutlich verbessert werden kann.

## 1 Ausgangssituation

Seit den 1990er Jahren wird in Österreich am Aufbau des vektororientierten Digitalen Landschaftsmodells (DLM) gearbeitet. Für einige der definierten Ebenen ist die Erfassung bereits abgeschlossen, andere – wie der Objektbereich Bodenbedeckung – werden erst aufgebaut. Gerade hier sind die historischen Wurzeln von besonderer Bedeutung, da die vorhandenen Unterlagen aus verschiedenen Quellen entstanden sind.

#### 1.1 Historische Entwicklung der Datenbestände

Ziel der Hersteller topographischer Karten war es seit jeher, die geometrische Darstellung von Objekten der Erdoberfläche mit Orientierungshinweisen zu verbinden, die oft die Darstellung der Bodenbedeckung beinhalten. Die ersten vollständigen Aufnahmen des Gebiets der Monarchie dienten rein militärischen Zwecken und reichen bis in die 2. Hälfte des 18. Jahrhunderts zurück (1. Landesaufnahme von 1764-1787). Neben der Orientierungshilfe waren aber auch Hinweise zur Passierbarkeit interessant, wodurch nur ausgewählte Formen der Bodenbedeckung zur Darstellung gelangten (Wald, Weingärten, Hopfen, Latschen, Fels etc.). Gängige Repräsentationsformen sind noch heute Flächenfarben und Signaturen, allerdings durchgängig

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Christine Ries, Michael Franzen: Bundesamt f
ür Eich- und Vermessungswesen (BEV), Abteilung Fernerkundung, Schiffamtsgasse 1-3, A-1025 Wien, email: {christine.ries, michael.franzen}@bev.gv.at

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Klaus Steinnocher: Austrian Research Centers (ARC), Bereich systems research, Tech Gate Vienna, Donau-City-Straße 1, A-1220 Wien, email: klaus.steinnocher@arcs.ac.at

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Florian Kressler: AustriaTech - Gesellschaft des Bundes für technologiepolitische Maßnahmen GmbH, Donau-City-Straße 1, A-1220 Wien, email: florian.kressler@austriatech.org

geprägt durch die kartographische Generalisierung. Die Aktualisierung der topographischen Karten erfolgte historisch durch wiederkehrende Neuaufnahmen in vier Generationen, heute kombiniert man eine zyklische Fortführung mit der Erhebung einzelner Nachträge von wichtigen bzw. markanten Objekten (z.B. Verkehrswege).

Eine zweite Quelle der Darstellung von Bodenbedeckung findet sich im Grundsteuerkataster, die bis ins frühe 19. Jahrhundert zurückreicht. Diese Basis für die Besteuerung von Grund und Boden beinhaltete auch die grafische Darstellung der Grundstücke, deren Abgrenzung ursprünglich aufgrund unterschiedlicher Kulturen erfolgte. Die laufenden Veränderungen von Grundstücken und deren Nutzung werden heute durch Angabe von Benützungsarten und Nutzungen ersichtlich gemacht, sind aber in letzter Zeit teilweise auch mit rechtlichen Informationen kombiniert (z.B. It. Forstgesetz) und stellen daher nur mehr eingeschränkt die tatsächliche Bodenbedeckung dar. Die Führung des Katasters ist heute im Vermessungsgesetz 1968 i.g.F. geregelt, sieht jedoch keine zyklische Aktualisierung der Benützungsarten und Nutzungen vor. Diese erfolgt Anlass bezogen (z.B. bei Grundstücksteilung), teilweise in Kampagnen (z.B. Erhebung der Bauflächen) oder zuletzt großflächig im Rahmen der Anlegung der Digitalen Katastralmappe (DKM).

Durch den immer stärker werdenden Einsatz geographischer Informationssysteme wurde die Nachfrage nach ungeneralisierten Vektordaten, welche die Objekte der Landschaft beschreiben, immer stärker. Dem Kundenbedarf entsprechend, begann im BEV Anfang der 1990er Jahre der Aufbau eines digitalen Landschaftsmodells, zunächst mit Verkehrswegen, Gewässer, Raumgliederung und geographischen Namen. Der Objektbereich Bodenbedeckung gewann erst im Laufe der Zeit höhere Bedeutung und wird nun verstärkt betrieben, wobei die bisher getrennt in Karten und Kataster vorliegenden Informationen zusammengeführt und in Zukunft auch gemeinsam aktualisiert werden sollen. Dieser neue Datensatz soll ausschließlich den Naturstand wiedergeben und im gleichen Zyklus wie andere topographische Datenbestände auf der Basis von Luftbildern bzw. Orthophotos aktualisiert werden. Die Änderung der gesetzlichen Rahmenbedingungen dafür ist zurzeit in Vorbereitung.

#### 1.2 Fallstudien zum Einsatz digitaler Technologien

Die öffentliche Verwaltung steht heute unter erhöhtem Einsparungsdruck. Sowohl beim Personal als auch beim Budget müssen immer wieder Kürzungen verkraftet werden, wobei aber gleichzeitig der Markt von der Geoinformation immer aktuellere und differenziertere Daten fordert. Um diesen Druck von beiden Seiten abfangen zu können, wurde der Einsatz digitaler Technologien im BEV seit Jahren vorangetrieben. Zunächst waren es Orthophotos, die seit 1993 in digitaler Form die Grundlage für die Fortführung der topographischen Kartenwerke (SW mit 0,5m GSD) und seit 1998 zusätzlich für die Aktualisierung der Digitalen Katastralmappe (Farbe mit 0,25m GSD) bilden. Zusätzlich wurden immer wieder Verfahren aus der Fernerkundung untersucht, um diese Prozesse weiter zu unterstützen, da die traditionelle Bearbeitung noch immer interaktiv durch Vergleich des jeweiligen Datensatzes mit der aktuellen Bildinformation erfolgt.

Im Rahmen der Projektinitiative *MISSION* (1995 – 1998) wurden die Möglichkeiten der "Ergänzung und Fortführung des topographischen Modells des BEV mit Fernerkundungsaufnahmen" untersucht (SINDHUBER & JANSA, 1998). In dieser Zeit bildete jedoch die begrenzte

Auflösung der verfügbaren Datenquellen einen einschränkenden Faktor für ihre Nutzung in größeren Maßstabsbereichen.

Das Projekt "*City-Sat Austria*" (STEINNOCHER et al, 2004) beschäftigte sich mit der "Analyse von Stadtgebieten und Siedlungsflächen in Österreich mittels satelliten- und luftbildgestützter Fernerkundung". Hier wurde erstmals das Potenzial der objektorientierten Klassifizierung digitaler Orthophotos zur Detektion von Veränderungen im Bauwerksbestand aufgezeigt.

Aufbauend auf diesen Erfahrungen wurde schließlich das Projekt "*Change Detection*" (STEINNOCHER & KRESSLER, 2006) im Rahmen der EuroSDR (European Spatial Data Research) initiiert. Darin wurden die Ergebnisse aus "*City-Sat*" auf eine allgemeine Basis gestellt und im internationalen Kontext mit unterschiedlichen Daten getestet und mit anderen Verfahren verglichen. Mit diesem Projekt konnte eindrucksvoll demonstriert werden, welche Möglichkeiten der Rationalisierung, aber auch der Qualitätssteigerung, mit dem Einsatz aktueller Technologien speziell bei der Erfassung und Aktualisierung von Bodenbedeckungsdaten verbunden sind. Die positiven Ergebnisse, speziell für die österreichischen Datengrundlagen, führten schließlich zu der Umsetzungsstrategie, die im vorliegenden Beitrag beschrieben wird.

# 2 Prinzip des automationsunterstützten Verfahrens

Die in den letzten Jahren immer bedeutsamer werdenden Verfahren der objektorientierten Bildanalyse weisen im Gegensatz zu pixelorientierten Verfahren die Möglichkeit auf, Nachbarschaftsbeziehungen in Form homogener Pixelgruppen (Segmente) zu berücksichtigen. Dadurch können auch Bilddaten mit hoher geometrischer Auflösung erfolgreich analysiert werden und komplexere Regelwerke in die Klassifizierung einfließen. Man kann diese Verfahren daher methodisch in zwei (ggf. iterativ ablaufende) Schritte trennen, zunächst die Bildung von Segmenten und anschließend deren Klassifizierung.

Das Prinzip der Segmentierung und Klassifizierung ist in STEINNOCHER et al. (2007) im Detail beschrieben. Geht man von Echtfarben Orthophotos aus, kann man mit dieser Methode natürlich nur eine beschränkte Anzahl von Klassen unterscheiden. Im Fall der o.a. Arbeit waren dies: Wald, Wiese, Feld, helles Objekt, graues Objekt, rotes Objekt und sonstiges Objekt.

Wesentlich für die Detektion der Veränderung ist die Gegenüberstellung von aktuellem Ergebnis und vorhandenen Informationen. Dies erfolgt grundsätzlich durch Verschneiden der verschiedenen Datenebenen entweder auf Vektorbasis (die Klassifizierungsergebnisse werden vektorisiert), oder auf Rasterbasis (die Bodenbedeckungsklassen werden in ein Grid umgewandelt). Während für künstliche Objekte (Straße oder Gebäude) bereits Erfolg versprechende Ansätze existieren, scheitern vollautomatische Ansätze jedoch sehr bald an der Komplexität natürlicher Objekte. Probleme können auch in der Definition der Bodenbedeckungsklassen auftreten, die mit den Klassen der Bildauswertung oft nicht in Übereinstimmung gebracht werden können.

Der vorliegende Ansatz verzichtet daher auf vollautomatisch generierte Ergebnisse und sucht zunächst nach automatisch generierbaren Indikatoren für mögliche Veränderungen. Verwendet wird der rasterbasierte Ansatz, wodurch mit einfachen Methoden der Bildverarbeitung die vorhandenen Bodenbedeckungsklassen den Ergebnissen der Klassifizierung gegenüber gestellt werden können. Für die Lösung der Probleme aus den erwähnten Definitionsdifferenzen wird mittels eines Bewertungsschlüssels die Plausibilität der Identität zwischen Klassifizierungsergebnis und Klassendefinition charakterisiert. Dieses Ergebnis fließt in die Aktualisierung der Bodenbedeckungsklassen ein, wobei der Aktualisierungsprozess weiterhin interaktiv mit herkömmlichen Methoden erfolgt (terrestrische oder photogrammetrische Messung, digitalisieren aus Orthophoto, etc.).

# 3 Anpassung der Prozedur an die Österreichische Ausgangslage

Nach der erfolgreichen Erprobung des in Abschnitt 2 vorgestellten Prinzips des automationsunterstützten Verfahrens zur Aktualisierung der Bodenbedeckung ist für die landesweite operationelle Umsetzung besonders die tatsächliche Vielfalt der Bodenbedeckungsklassen in Österreich zu berücksichtigen, wodurch sich vor allem im Bereich Bewertungsschlüssel und Vergleich zwischen Klassifizierungsergebnis und Altstand der Bodenbedeckung notwendige Ergänzungen ergaben. Generell gilt, dass das Verfahren möglichst einfach und robust bleiben und auf unterschiedliche Regionen anwendbar sein soll. Mit dieser Zielsetzung kann das angestrebte standardisierte Verfahren für ganz Österreich nicht alle regionalen Unterschiede und Sonderfälle abdecken, was in der Gesamtheit wiederum zu einem mehrstufigen Verfahren führt. Das heißt, für die Aktualisierung von "Standardklassen" (damit sind Bodenbedeckungsklassen gemeint, die über ganz Österreich mehr oder weniger gleichmäßig verteilt vorkommen; z.B. Gebäude, Garten, Verkehrsflächen, Gewässer, Wiese, Wald) ist ein für ganz Österreich gültiges standardisiertes Verfahren vorgesehen. In regional begrenzten Gebieten treten zum Teil stark gehäuft Sonderformen von Klassen auf (z.B. Weingärten oder Latschen), welche in anderen Gebieten überhaupt nicht vorkommen. Diese sind aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften nicht sinnvoll gemeinsam mit den Standardklassen zu bearbeiten. Es müssen daher getrennte Verfahren entwickelt werden, die vor oder nach der Behandlung der Standardklassen anzuwenden sind. Diese Ansätze befinden sich zur Zeit noch in einem experimentellen Stadium, so dass hier noch nicht näher darauf eingegangen werden kann.

Das Verfahren zur Bearbeitung der Standardklassen umfasst im Wesentlichen die Schritte Segmentieren der Orthophotos, objektorientierte Klassifizierung und Vergleich der Ergebnisse mit dem Altstand der Bodenbedeckung. Bei den Schritten Segmentierung und objektorientierte Klassifizierung können die Ergebnisse aus dem EuroSDR-Projekt "*Change Detection*" übernommen werden, für eine Detailbeschreibung dieser Schritte wird daher auf (STEINNOCHER & KRESSLER, 2006) verwiesen. In der operationellen Umsetzung müssen die Parameter der Segmentierung und der Klassenbeschreibungen jeweils an das vom Bearbeitungsgebiet verfügbare Bildmaterial angepasst werden, um die von jahreszeitlichen bzw. von den am Aufnahmetag vorherrschenden Aufnahmebedingungen abhängenden Schwankungen in Kontrast/Farbbalance/Helligkeit/etc. des Bildmaterials zu berücksichtigen.

Die Klassen der Klassifizierung wurden bewusst allgemein definiert, um sie möglichst zuverlässig ableiten zu können (siehe Abbildung 1). Es werden auch nicht sofort die definierten Bodenbedeckungsklassen gesucht, denn es kann beispielsweise ein rotes Objekt in der Klassifizierung einerseits den Hinweis auf ein Gebäude mit rotem Dach, aber genauso gut auf einen rötlichen Belag eines Sportplatzes darstellen. Oder ein graues Objekt in der Klassifizierung

kann in der Natur tatsächlich z.B. zu einer Straßenanlage, zu einem Gebäude mit grauem Flachdach oder zu einer Fels- oder Geröllfläche gehören.



Abbildung 1: Klassenhierarchie

Schließlich wird das Ergebnis der Klassifizierung (K) mit dem Altstand der Bodenbedeckung (B) verglichen, wodurch Gebiete mit einer möglichen Veränderung in der Bodenbedeckung hervorgehoben werden können. Dieser Vergleich erfolgt anhand eines Bewertungsschlüssels (siehe Tabelle 1), in dem die unterschiedlichen Klassenkombinationen aus Klassifizierung und Bodenbedeckung bewertet und in die Plausibilitätsstufen identisch, plausibel, fraglich und unterschiedlich unterteilt werden. Identisch und plausibel bedeuten, das Ergebnis der Klassifizierung und Altstand der Bodenbedeckung stimmen soweit zusammen, dass kein Hinweis auf eine Veränderung abgeleitet werden kann, beispielsweise baumartiges Objekt (K) / Wald (B) oder graues Objekt (K) / Gebäude (B). Fraglich und unterschiedlich deuten auf eine mögliche oder wahrscheinliche Veränderung hin, beispielsweise deutet wiesenartiges Objekt (K) / Gebäude (B) auf ein entferntes Gebäude hin oder rotes Objekt (K) / Wiese (B) auf ein neues Gebäude.

Klassifizierung	baumartiges Objekt	wiesenartiges Objekt	erdiges Objekt	rotes Objekt	helles Objekt	graues Objekt	sonstiges Objekt
Bodenbedeckung							
Gebäude	F	F	F	I.	I.	I	I
Garten	I	I	I	F	F	F	F
Gebäudenebenfläche	F	F	F	I.	I.	I	I
Straßenverkehrsfläche	F	F	F	Р	Р	Р	Р
Freizeitanlage	Р	Р	Р	P	P	Р	Р
Acker	F	Р		U	U	υ	U
Wiese	F	L. L.	F	U	U	υ	U
Wald	L. L.	Р	F	U	U	υ	U
Gewässer	F	F	F	F	F	F	F
Fels und Geröll	F	F	F	F	L.		Р

Plausibilitätsstufen der Klassenkombination:

#### I ... identisch; P ... plausibel; F ... fraglich; U ... unterschiedlich

Tabelle 1: Bewertungsschlüssel (Auszug) für Vergleich zwischen Altstand der Bodenbedeckung und Ergebnis der Klassifizierung
Das Ergebnis der Bewertung ist eine Indikatorenkarte für mögliche Veränderungen in der Bodenbedeckung (siehe Abbildung 2). Diese unterstützt den Operateur bei der Aktualisierung der Bodenbedeckung, sodass er nicht mehr das gesamte Bearbeitungsgebiet flächig auf Veränderungen prüfen muss, sondern sich sofort auf die Bearbeitung der als fraglich oder unterschiedlich ausgewiesenen Bereiche konzentrieren kann. Dabei kann er entweder sofort auf Basis des Orthophotos die tatsächliche Bodenbedeckungsklasse zuweisen oder, falls die Frage mittels Orthophoto nicht eindeutig lösbar ist, die Bearbeitung des offenen Bereichs durch eine andere Bearbeitungsmethode (z.B. Feldvergleich) vormerken.



Abbildung 2: a) Orthophoto, b) Klassifizierung, c) Bodenbedeckung alt, d) Indikatorenkarte

Die in der Indikatorenkarte aufgezeigten möglichen Veränderungen basieren auf dem bisher empirisch erstellten Bewertungsschlüssel, welcher im Zuge der operationellen Umsetzung mit den Sachbearbeitern im Detail noch abzustimmen ist.

# 4 Status und Umsetzungskonzept

#### 4.1 Erste Ergebnisse aus den Pilotversuchen

Seit dem Start des Projekts "Change Detection" sind zwei Testgebiete bearbeitet worden. In den internationalen Vergleich wurden zunächst zwei Gemeinden in der Nähe von Graz einbezogen, welche im Wesentlichen aus Siedlungsgebiet, landwirtschaftliche genutzten Flächen und Wald bestehen. In diesem Gebiet wurde der Aktualisierungsprozess noch auf Basis der bisherigen Benützungsarten und Nutzungen der DKM untersucht. Von Sachbearbeitern des zuständigen Vermessungsamts wurde der ca. 10 Jahre alte Stand der DKM mit herkömmlichen Werkzeugen unter Zuhilfenahme aktueller digitaler Orthophotos fortgeführt. Parallel dazu wurden die gleichen Orthophotos nach dem beschriebenen Verfahren klassifiziert. Sowohl die erstellte Indikatorenkarte als auch das Ergebnis der Klassifizierung wurden in die Evaluierung einbezogen. Für den Vergleich der Verfahren standen dieselben Sachbearbeiter wie bei der Aktualisierung zur Verfügung. Wesentliche fachliche Erkenntnisse waren, dass eine große Zahl nicht aktualisierter Flächen durch das neue Verfahren erkannt und dadurch die Vollständigkeit und Qualität der Aktualisierung deutlich verbessert werden konnte. Auf der persönlichen Ebene zeigten sich einerseits Schwächen durch die fehlende Benutzerführung in diesem experimentellen Verfahren (siehe Abschnitt 4.2), andererseits aber auch steigender Enthusiasmus mit fortschreitender Erfahrung mit dem neuen Werkzeug.

Nach der BEV-internen Entscheidung, dieses Verfahren weiter zu verfolgen und in einen größeren Feldversuch einzusteigen, steht seit Ende 2006 ein gesamter Flugblock (ca. 600 km<sup>2</sup>) im Gebiet des Vermessungsamts Liezen/Steiermark in Bearbeitung. Dieser Block weist eine deutlich höhere Anzahl der definierten Bodenbedeckungsklassen auf und wird für die in Abschnitt 3 beschriebene Anpassung der Parameter für den robusten landesweiten Einsatz verwendet. Konkrete Ergebnisse stehen zurzeit noch aus.

#### 4.2 Umsetzungskonzept für den operationellen Betrieb

Die laufende Adaptierung des Verfahrens an die gegebene Ausgangssituation erfolgt auf Basis der Software Definiens Professional 5.0. Diese Desktopversion bietet bereits die optimale Ausgangssituation für die Entwicklung des Workflows, jedoch zeichnen sich Einschränkungen hinsichtlich eines operationellen Betriebs mit großflächigen Anwendungen deutlich ab. Erste Versuche in einer Testumgebung der serverseitig skalierbaren Definiens Enterprise Image Intelligence Suite zeigten bereits, dass diesem Engpass mit dem neuen Konzept der verteilten Rechnerleistung zu begegnen ist – eine wesentliche Voraussetzung für landesweite Anwendungen.

In der Weiterverarbeitung zeigte der experimentelle Versuch im Raum Graz einen wesentlichen Mangel durch die fehlende Benutzerführung für dieses neue Verfahren auf. Dazu muss erwähnt werden, dass die Aktualisierung der DKM auf CAD-Basis mit einer intern entwickelten Benutzerschale erfolgt, die für diesen Versuch nicht individuell angepasst werden konnte. Die

Sachbearbeiter mussten sich daher zunächst selbst in der Fülle der Informationsquellen zurechtfinden und die geeigneten Kombinationen und Abfolgen von ein- und auszublendenden Ebenen erarbeiten. Ein vorrangiges Ziel des nun laufenden erweiterten Feldversuchs wird es daher sein, eine Benutzerschnittstelle zu entwerfen, die ein systematisches Abarbeiten der aufgezeigten Änderungen ermöglicht und den Status der Bearbeitung dokumentiert, damit die Vollständigkeit sicher gestellt und auch die Nachvollziehbarkeit im Sinne eines Qualitätsmanagements gewährleistet ist. Geeignete Lösungen können hier am ehesten durch den Einsatz von GIS-Produkten gefunden werden, was jedoch eine komplette Neuorientierung für die Führung des Katasters bedeutet und daher nicht von den Ergebnissen dieses Projekts allein abhängt.

# 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse verschiedener externer und interner Studien und Versuche haben das große Rationalisierungspotenzial beim Einsatz automationsunterstützter Verfahren zur Aktualisierung von Bodenbedeckungsklassen aufgezeigt. Trotz Verzichts auf einen vollautomatischen Ansatz kann dem Bearbeiter gerade der zeitaufwändige und fehleranfällige Bearbeitungsschritt der Suche nach Veränderungen abgenommen werden, wodurch er sich voll auf die wesentliche Aufgabe der Nachführung von Veränderungen mit dem geeigneten Werkzeug konzentrieren kann. Gemeinsam mit der Neuordnung der Bodenbedeckungsklassen ist damit die Voraussetzung gegeben, dem verstärkten Druck des Marktes nach aktuellen und benutzergerechten Bodenbedeckungsdaten nachzukommen. Mit der noch bevorstehenden Umstellung der Führung des Katasters in einem Geographischen Informationssystem sollte einem zeitgemäßen aktuellen Produkt öffentlicher Geobasisdaten nichts mehr im Wege stehen.

## 6 Literaturverzeichnis

- SINDHUBER, A. & JANSA, J., 1998: Ergänzung und Fortführung des topographischen Modells des BEV mit Fernerkundungsaufnahmen. Endbericht zum Projekt Mission für das Bundesministerium für Wissenschaft und Verkehr.
- STEINNOCHER, K., KRESSLER, F., PETRINI-MONTEFERRI, F. & WEICHSELBAUM, J., 2004: City-Sat Austria, Analyse von Stadtgebieten und Siedlungsflächen in Österreich mittels satellitenund luftbildgestützter Fernerkundung. Endbericht für das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit.
- STEINNOCHER, K. & KRESSLER, F., 2006: Change Detection. Final Report, EuroSDR Official Publication #50, S. 111 – 182.
- STEINNOCHER, K., KRESSLER, F., FRANZEN, M. & RIES, C., 2007: Objekt-orientierte Klassifikation von Orthophotos zur Aktualisierung der Digitalen Katastralmappe. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 95. Jahrgang, 1/2007, im Druck.

# Video-like MiSAR image sequence processing

# G. SAUR<sup>1</sup>, M. EDRICH<sup>2</sup>, N. HEINZE<sup>1</sup> & W. KRÜGER<sup>1</sup>

Abstract: The miniature SAR-system MiSAR has been developed by EADS Germany for light weight UAVs (Unmanned Aerial Vehicle) like the German Luna system. In a special imaging mode MiSAR generates SAR image sequences with approximately 1 Hz framerate and an overlap area of more than 90% for successive frames. Thus special video processing steps are applicable to the SAR image sequence: (1) Image based coregistration of consecutive image frames. (2) Image sequence mosaicing. Compared to strip SAR mode, this application is not limited to straight linear flight paths and constant squint angles. (3) Image stabilization, so that the fixed scene object is remaining in a constant place relative to a surrounding (virtual) image frame. Similar to (1) and (2), this application uses the registration parameters estimated by the coregistration algorithm. The algorithm was initially developed to process video-imagery and was adapted to the special characteristics of MiSAR imagery. The extracted image features have been proven well suited in video and robotics applications. After feature matching, a robust estimator computes the parameters of an adjustable image-to-image transformation, Additionally, when using SAR images, an appropriate gray value scaling must be applied to adjacent images in order to get a good mosaicing and stabilization result. The algorithm is implemented on a standard PC, is linked to the SAR processing unit, processes the image sequence in real time, and displays it for the visual interpretation by photo interpreters (PI). Our experiences show pretty good results since the registration algorithm works very well, even in cases where the SAR images show some SAR specific characteristics like spatial convolutions and displacements of structures. local blurring or changes in flight and squint direction.

#### 1 Introduction

In the past years, Synthetic Aperture Radar (SAR) sensors have found a wide application field for remote sensing purposes. SAR images form satellites (ERS, Radarsat, Envisat, TerraSAR in the near future) are available, commercially and for research applications. On the other hand, the civil application of airborne SAR images until now is limited to few cases, due to the availability and the cost of sensors and measurement campaigns. But some technological trends developed for military reconnaissance may be interesting for future civil applications, too.

Reconnaissance with small UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) is done until now mainly with optical video and IR-video sensors. In situations with fog and low clouds reconnaissance is prevented due to the missing of the all-weather capability of these sensors. This may happen in situations where situation-awareness is essential. Especially in tropical regions such conditions appear regularly. This gap in reconnaissance-coverage can be closed by a SAR-sensor.

Until now, size, power consumption and weight of SAR sensors prohibit their installation on small UAVs. To overcome this limitation, EADS Germany has developed the MiSAR sensor with a weight of only 4 kg. Due to the installation on a small UAV, there are challenges to overcome, to create high quality images in real-time.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Fraunhofer IITB, Fraunhoferstr 1, 76131 Karlsruhe, Germany

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> EADS Deutschland GmbH, 89077 Ulm, Germany

Furthermore the generation of real-time imagery is only one step towards the objective to extract information from the flight-mission. Next step was to develop processing for this imagery and to develop an image exploitation station to give photo interpreters (PI) best working conditions for their image exploitation task. Photo interpreters of UAVs, now mainly experienced with visual interpretation, are not used to SAR images, especially not with SAR image sequence characteristics. So they should be supported to improve their ability to carry out their task with a new, demanding sensor system.

Due to the flexible flight path of a small UAV, strip mode processing is not adequate. MiSAR generates single images in 1Hz frame rate. This has the advantage that also highly variable flight paths can be processed. The resulting imagery has the form of an image sequence with its own characteristics. A disadvantage of image sequences is the small coverage of each individual frame. To overcome this, we use a mosaicing algorithm, which was initially developed to process video-imagery and was adapted to the characteristics of MiSAR imagery. The generation of mosaics is based on the extraction of image features from successive images and matching of these features. From the matched features the transformation can be estimated and the mosaic can be generated.

# 2 MiSAR-Sensor

The overall goal was to design a miniaturized SAR sensor which can be integrated even in small UAVs currently operated on a regular basis. The image resolution and swath should be comparable to the respective capabilities of electro optical sensors used in small UAVs (MASEY 2003). To transmit the SAR data to the UAV ground control station, the standard analogue video data links used for the E/O sensors should be usable. With these preconditions, the design goals were determined as shown in table 1. The following sections describe the design considerations leading to the MiSAR system concept.

#### 2.1 Radar Range

The MiSAR-antenna depression angle  $\varphi$  was chosen to  $\varphi = 18^{\circ}$ ... 30°. This range of values provides a good compromise between the three goals of preserving a significant object shadow length for image evaluation purposes, maximizing the shadow-free area and minimizing resolution deterioration. Considering typical small-UAV flight altitudes of h < 1800m, the maximum radar range can thus be limited to rmax < 4km.

#### 2.2 Radar Principle

Basically, a pulse-doppler (PD) and a FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) concept are potential candidates for the radar front-end. Based on EADS' experience in similar applications (ELTERICH & SCHMALENBERGER 2003), a FMCW system has clear advantages over the PD system when it comes to size, weight and power considerations. A PD system typically requires a high peak transmission power, which in turn leads to comparatively heavy power amplifiers and power supplies as well as to higher over-all power consumption. In contrast, the FMCW system operates with a constant low transmission power which can be generated by highly integrated solid-state power amplifiers on MMIC basis. Furthermore, the PD system requires a higher-rate signal processing as compared to the FMCW system, which can reduce its raw data bandwidth drastically by the deramp-on-receive operation (WEHNER 1987). This again leads to lower weight and less power consumption for the FMCW system. However, this is only true if the inherent problems of FMCW systems can be solved (DE WIT & HOOGEBOOM 2002, ELTERICH & SCHMALENBERGER 1987): Ensuring sufficient transmitter-receiver isolation and frequency ramp linearity for the envisaged range of 4km is a challenge that requires a solid technology basis and long-term experience in this area (WEGIN & EDRICH 2003).

#### 2.3 Selection of Frequency Band

For a highly miniaturized UAV SAR, Ka-band was found to be the optimum choice. Ka-band signals are subject to higher atmospheric and precipitation losses as compared to Ku-band and X-band signals. However, at the given maximum radar range, see section 2.2, these losses are still moderate and can be accounted for in the radar system power budget. Clear advantages of the Ka-band are the good perceptibility of man-made objects in the SAR images, the motion compensation relaxation for a given cross-range resolution and the potential for component miniaturization at these high frequencies.

#### 2.4 Partitioning of the Image Chain

Fig. 2 shows the typical SAR image chain. The radar front-end consists of the waveform generator, transmitter, antenna system and receiver. In FMCW radar with a deramp-on-receive concept, the radar raw data at the output of the receiver is an analogue signal with a bandwidth of several MHz. This signal is sampled and digitally processed in the following SAR processor unit. At the output of the SAR-processor unit, SAR images are available to be displayed on a display unit or to be fed into an optional image processor unit with an ATR (Automated Target Recognition) function to assist the operator in the image exploitation process. In the UAV SAR application, this image chain has to be split up in an onboard segment and a ground-based segment. Whereas the radar front-end clearly has to be air-borne and the display unit must be on the ground, the SAR processor unit and the optional image processor unit can be either onboard or on the ground. To minimize onboard size, weight and power for the SAR sensor, it is advantageous to do the digital processing in the ground segment. However, the overall radar systems design has to account for the bandwidth and signal dynamics constraints given by the UAV legacy data link systems as mentioned in the table of Fig. 1 left.

Carrier platforms	small size UAVs
Image resolution	~ 0.5m x 0.5m
Swath	500m 1000m
max. onboard weight	4kg
max. onboard volume	10 liter
max. onboard power demand	100W
data link type	analogue
data link bandwidth	5MHz



Figure 1: Left Table: Design goals for the MiSAR sensor system. Right: Luna UAV with MiSAR





## 3 Image Characteristics and Preprocessing

The images delivered from the SAR processor have the following characteristics:

- Coverage of about 400 (azimuth) x 700 (range) meters. The area is a trapezoid with less width in near range than in far range. The angle of the mid axes depends on the squint angle which can vary within the flight (see Fig. 3 left).
- The radar incidence angle (off nadir) varies from 68° in near range to 76° in far range.
- At a speed of up to 40 meter/second and a frame rate of 1 Hz, consecutive images will have an overlap of approximately 90 %.
- The MiSAR image frames have a gray value range that is coded by 16bit.
- For each image frame, some collateral data carry information about the SAR parameters, the imaging geometry and the flight path (see Fig. 3 right).

Thus, the image sequences have the characteristics of a "SAR video" of 1 Hz and so we applied some video-like processing to these data.



Figure 3: Left: Single MiSAR image with trapezoidal coverage (yellow lines) and squint direction (magenta line). Right: Flight track (red), with line of sights (orange) and some corresponding SAR images over map background

Image pre-processing is done in an initial step for displaying purposes and before applying further algorithms (e.g. mosaicing). This includes some filter and a gray value scaling, so that consecutive MiSAR images have the same gray value characteristics. This is essential, since due to the different variations e.g. in the scene, the aspect angle, the squint angle etc. the images must have a uniform gray scaling, so that the mosaicing result has no "gray steps".

The following examples in Fig. 4 show images obtained during the MiSAR flight test campaigns. Fig. 4 left shows a pair of power poles with the shadows of the power lines being clearly visible. Fig. 4 right shows a small mosaic with hardly visible gray steps and with different shading for displaying the areas with more reflectance. Again shadows give useful information about the scene. Especially the building denoted with a white rectangle can be measured in size and form.



Figure 4: Examples of MiSAR-Images. Left: Even the power line is visible in the shadow. Right: Due to excellent shadow reproduction, the detection and measurement of buildings (e. g. white rectangle) is possible (mosaic example).

## 4 Image Coregistration

The basic idea in MiSAR image processing consists in using image coregistration methods. So, in spite of conventional strip SAR processing, image coregistration is applied to create larger image mosaics. Fraunhofer IITB Karlsruhe has developed algorithms for the m<sup>3</sup> motion applications for moving video cameras (MÜLLER et al. 2006). The basis is a feature based image-to-image registration which is applied to consecutive images of a video or MiSAR sequence.

To find image features, we apply the Förstner-Harris corner detector (FÖRSTNER & GÜLCH 1987, HARRIS & STEPHENS 1988) which detects image locations where the image function has significant changes in both directions. Robust parameter estimation is used to find a transformation from the generally outlier-contaminated set of putative point correspondences (KRÜGER 2001, MÜLLER et al. 2006). To cope with large image motions, the whole estimation process is iterated at the different resolutions of an image pyramid.

## 4.1 Mosaicing

Mosaicing is based on fast and robust estimation of geometric transformations between images. For MiSAR-images we use affine transformations, which are estimated from corresponding images features. Single images of MiSAR cover an area of approximately 400m x 700m at a resolution of 0.5m. To enlarge the field of view and to cover larger areas with overview-images, mosaicing is applied. Compared to strip-mode SAR-processing, mosaicing has the advantage that also non-straight linear flight paths and varying squint angles can be processed.

Using the estimated image transformations, adjacent regions of consecutive images are warped and stitched together to form an on-line mosaic, which is continuously presented to the user – see Fig. 4. To get even larger coverage, off-line mosaics can be generated– see Fig. 5.



Figure 5: Mosaicing of image sequences. Top left: Mosaic of nadir airborne video images. Top right: Part of Misar mosaic. Bottom: Large Mosaic of MiSAR images. Area in white rectangle is shown at top right.

#### 4.2 Mosaic Geocoding

For practical application, a precise geocoding of the computed MiSAR mosaics is essential. Our work on image based SAR geocoding (see SAUR & KRÜGER 2004) is in investigation to be applied to these data. Since the MiSAR's collateral data are not accurate enough to create the mosaics without looking into the images, these data are not reliable enough for correct geopositioning, too. In our approach, the extracted image structures are matched to the structures given by a geocoded vector map or extracted from a geocoded second image. As the mosaic is constructed of many single images and their transformations, an overall optimization with respect to the correspondences has to be performed. In order to get best undistorted mosaics, the use of few point correspondences with rsp. to a reference image (e.g. satellite image), could be set interactively, is possible. The optimization of course is running fully automatically.

#### 4.3 Spot Fixing

Subsequent MiSAR image frames have an overlap of approximately 90 percent. Therefore spot objects rest visible for about 4- 8 frames, but, as the UAV passes by, under changing illumination conditions. In this case, image coregistration can be used for image stabilization, which means, that the images are warped onto a common image frame with centered spot object.

The result is a short image sequence which fixes the spot object. An interesting parallel to video along track stereo consists in creating anaglyphic images which in fact cause a "pseudo-stereo" impression of the scene (Fig. 6). The basic idea is, that the (slant range) SAR viewing geometry corresponds to the human viewing geometry (approx. central projection) when rotating the observers location by 90° in the plane spanned by the ray lines and perpendicular to the ground plane while the illumination location rests fixed. This is done for each SAR scanline. The result is that a MiSAR image with "shadows down" corresponds to photo with a (visual) aspect angle of 90° - incidence angle. By this, the SAR specific foreshortening and shadowing is covered approximately pretty well (but SAR overlay effects are not covered, of course).



Figure 6: Spot fixing MiSAR image pairs in red-cyan-anaglyphic representation for Pseudo-stereo visualization (left: buildings, right: parking lot)

# 5 System Integration and Experimental Application

Parts of the described algorithms have been integrated into the MiSAR ground station (HEINZE et. al. 2007). There, additional algorithms are available, like image filtering and enhancement, screening, object detection, and tracking. The operator can choose between different algorithms, in particular the mosaicing, screening, grey-value manipulation etc. as described above. Furthermore, navigation in the acquired imagery and annotation of images is possible. The system is designed for on-line real time and off-line exploitation.

The ground segment is entirely made up of commercial PC components. For the image formation part the intrinsic SAR processor unit is a workstation which is linked by a gigabit ethernet switch to two peripheral workstations for data preprocessing and data storage. The exploitation station part are two PCs used for Human-Machine interface, visualization and running of automatic image processing and exploitation algorithms.

During test flights, antenna stabilization and motion compensation have shown to be extremely critical in the small-UAV environment and can be implemented based on measured motion data from an INS system. In the SAR processor, the INS-based motion compensation can be assisted by an autofocus approach, thereby relaxing the accuracy requirements for the motion sensors.

On the other hand, the test data have shown that the image processing approach creating MiSAR mosaics works very accurate and reliable.

# 6 Summery

The lightweight MiSAR sensor takes high quality SAR image sequences, filling the actual gap in reconnaissance coverage during fog and low cloud conditions, considering light weight UAVs. To overcome the challenge to install a SAR on a relatively agile sensor platform, a FMCW SAR-system with image sequence characteristics was developed by EADS.

We developed algorithms for image coregistration by adapting video processing to MiSAR image sequences. On this basis, MISAR mosaicing, spot fixing and image stabilization is possible and works pretty well on the MiSAR imagery of the test flights. The main application is the processing and displaying of MiSAR for visual interpretation by photo interpreters (PIs). The development process involved close contact and consultation of PIs. A ground station for real time image formation and image exploitation with automatic image exploitation algorithms was integrated and tested. Further image processing investigations are related to the evaluation of the MiSAR mosaics by ATR and the spot fixing images by multi-image evaluation.

# 7 Referecnces

- ELTERICH, A. & SCHMALENBERGER, R., 2003: mmW FMCW Radar Seeker. Proc. of the International Radar Symposium, pp. 475-480, Dresden, 2003.
- FÖRSTNER, W. & GÜLCH, E., 1987: A Fast Operator for Detection and Precise Location of Distinct Points, Corners and Centers of Circular Features. Proc. of the Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken Suisse 1987, 281-305.
- HEINZE, N., EDRICH, M., SAUR, G. & KRÜGER, W., 2007: "Image exploitation for MiSAR", in Proc. SPIE Vol. 6568, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XIV, E. G. Zelnio, F. D. Garber Eds., Orlando, FL, April 2007.
- HARRIS, C. & STEPHENS, M., 1988: A combined corner and edge detector. Proc. 4th Alvey Vision Conference, University of Manchester, 31st August - 2nd September 1988, 147-151.
- KRÜGER, W., 2001: Robust and efficient map-to-image registration with line segments. Machine Vision and Applications 13 (2001), 30-50.
- MASEY, J., 2003: Unmanned Vehicles Handbook 2003. The Shephard Press, Burnham.
- MÜLLER, M., KRÜGER, W. & HEINZE, N., 2000: "Model-based target and background characterization" in Proc. SPIE Vol. 4029, Targets and Backgrounds VI: Characterization, Visualization, and the Detection Process; W. R. Watkins, D. Clement, W. R. Reynolds; Eds. Publication July 2000, pp. 88-92.
- MÜLLER, M., KRÜGER, W. & SAUR, G., 2006: "Robust image registration for fusion", Information Fusion, Article in Press, Corrected Proof 2006.
- SAUR, G. & KRÜGER, W., 2004: Fine-geocoding of SAR using robust map-to-image registration, in Proc. EUSAR 2004, Ulm, Germany, pp. 937-940, VDE 2004.
- WEHNER, D.R., 1987: High Resolution Radar. Artech House, Norwood, 1987.
- WERGIN, A. & EDRICH, M., 2003: First LUNA Flight Results with a Miniaturised SAR. Proc. of the EURO UVS International Technical Conference on Unmanned Vehicle System Technologies, Brussels, 2003.
- DE WIT, J. & HOOGEBOOM, P., 2002: High-Resolution Airborne FM-CW SAR: Design and Processing Aspects. Proc. of EUSAR 2002, pp. 163-166, Cologne, 2002.

# Detektion wiederholter und symmetrischer Strukturen in Fassadenbildern

#### SUSANNE WENZEL, MARTIN DRAUSCHKE & WOLFGANG FÖRSTNER<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Regelmäßige Strukturen und Symmetrien kennzeichnen viele Gebäudefassaden oder Objekte im Umfeld von Gebäuden. Für die automatisierte Bildinterpretation weisen diese Strukturen auf künstliche Objekte hin, führen aber auch zu Schwierigkeiten bei klassischen Bildzuordnungsverfahren. Die Suche und Gruppierung zusammengehöriger Merkmale kann daher sowohl zur Identifikation künstlicher Objekte als auch zur Verbesserung von Zuordnungsverfahren dienen.

Für die Analyse von entzerrten Fassadenaufnahmen haben wir das Verfahren von **Fehler!** Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zur Detektion symmetrischer Bildstrukturen zu einem Verfahren zur Detektion verschiedener, sich wiederholender Bildstrukturen erweitert und aus den detektierten wiederholten Objekten eine minimale Beschreibung der Struktur der Fassadenelemente in Form von achsenparallelen Basiselementen abgeleitet.

# 1 Einleitung

Viele Gebäude werden durch symmetrische bzw. sich wiederholende Strukturen gekennzeichnet, insbesondere ist die Anordnung der Fenster in einer Fassade oftmals durch ein festes Muster geprägt. Diese Regelmäßigkeiten weisen auf künstliche Objekte hin, die wir für die automatisierte Bildinterpretation nutzen wollen. Die Suche und Gruppierung zusammengehöriger Merkmale kann daher sowohl zur Identifikation künstlicher Objekte als auch zur Verbesserung von Zuordnungsverfahren dienen, wo wiederholte Strukturen im Allgemeinen Schwierigkeiten bereiten.

Wir gehen davon aus, dass sich wiederholende Strukturen in Fassaden in horizontaler und vertikaler Richtung verlaufen. Aus diesem Grund entzerren wir die Bilder manuell vor der Merkmalsextraktion. Dieser Schritt könnte auch automatisiert werden, indem die beiden wichtigsten Fluchtpunkte nach **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** bestimmt werden.

Die Ableitung des Musters der Fassadenelemente ist für das modellbasierte Lernen im Kontext der Gebäudeerkennung von hoher Bedeutung. Des Weiteren kann über die Struktur des Musters auf Lücken in der Merkmalsextraktion geschlossen werden. Das Ziel dieser Arbeit ist die Bestimmung einer minimalen Beschreibung der Struktur der Fassadenelemente in Form von achsenparallelen Basiselementen. Diese sollen die Verteilung der Grundelemente der Fassade, insbesondere der Fenster, in Form von Translationsvektoren und der Anzahl der auftretenden Wiederholungen der Objekte in der entsprechenden Richtung charakterisieren.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Institut f
ür Geodäsie und Geoinformation, Professur f
ür Photogrammetrie, Nussallee 15, 53115 Bonn; {susanne.wenzel,martin.drauschke}@uni-bonn.de, wf@ipb.uni-bonn.de

#### 2 Symmetriedetektion

Das hier vorgestellte Verfahren basiert auf der Arbeit von Fehler! Verweisquelle nicht konnte gefunden werden. in der ein Verfahren zur Detektion dominanter Symmetrien vorgestellt wurde. Die grundlegende Vorgehensweise ist in Abbildung 0 skizziert. Zunächst markante werden Bildpunkte detektiert. Wir verwenden den SIFT-Operator nach Fehler! Verweisquelle konnte

Verfahren jeder extrahierte Punkt



nicht Abbildung 0: Schematische Darstellung der Detektion symmetgefunden werden., da bei diesem rischer Merkmals-Paare, nach Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.

durch seine geometrischen Eigenschaften (Zeile, Spalte, Maßstab und Orientierung) sowie einen so genannten Deskriptor beschrieben wird, der die lokale Umgebung des Merkmals geeignet codiert. Bei Verwendung der SIFT-Merkmale sind diese Deskriptoren in Richtung der Orientierung des Merkmals normiert und damit rotationsinvariant.

Durch Umsortierung der Elemente des Deskriptor-Vektors können gespiegelten Versionen der detektierten Merkmale sehr einfach abgeleitet werden Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.

Zuordnung des originalen Merkmals-Satzes zu den gespiegelten Kopien führt zu Paaren potentiell symmetrischer Merkmale. Die Symmetrieachse jedes Paares wird durch ihre Orientierung  $\theta$  und ihren Abstand  $\rho$  zum Ursprung repräsentiert.

Die im Bild dominanten Symmetrien können dann durch Clusterung der gefundenen Symmetrieachsen abgeleitet werden. Zur Bewertung der Qualität der Symmetrie der zugeordneten Merkmals-Paare wird eine Gewichtung der Symmetrie in Abhängigkeit von Orientierung, Skalendifferenz und Distanz der Merkmale eingeführt.

#### 2.1 Bewertung der Symmetrie einzelner Merkmals-Paare

Mit dem Winkel-Symmetrie-Gewicht  $\Phi_{ii} \in [-1,1]$ 

$$\Phi_{ij} = -\cos(\varphi_i + \varphi_j - 2\theta) = -\cos(\alpha + \beta)$$
(1)

werden diejenigen Merkmals-Paare hoch bewertet, deren Orientierung möglichst symmetrisch bzgl. der ermittelten Symmetrieachse dieses Paares ist. Abbildung 0 verdeutlicht den Einfluss der Orientierungen der Merkmale bzgl. ihrer Verbindungslinie. Die Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  ergänzen sich zu 180°, falls die Orientierungen der Merkmale exakt spiegel-



Abbildung 0: Bewertung der Symmetrie der Orientierung der Merkmale  $p_i$  und p<sub>i</sub>. Wenn die Merkmale genau symmetrisch orientiert sind, ergänzen sich die Winkel  $\alpha$  und  $\beta$ , zwischen Hauptorientierung und Verbindungslinie der Merkmale zu 180°.

symmetrisch zur Symmetrieachse der Merkmale sind.

Zwei weitere Gewichte gehen in die Bewertung von Symmetrien ein, das Skalengewicht  $S_{ii}$  sowie das Distanzgewicht D<sub>ii</sub>, siehe dazu Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. Das Skalengewicht beurteilt die Maßstabsdifferenzen zwischen den Merkmals-Paaren. Für Merkmalspunkte aus weit auseinander liegenden Skalen liegt  $S_{ii}$  nahe bei 0, bei identischen Skalen nimmt  $S_{ii}$ den Wert 1 an. Durch das Distanzgewicht kann der Abstand zur potentiellen Symmetrieachse und damit die Ausdehnung der symmetrischen Objekte überprüft werden. Liegen zwei Merkmalspunkte weit von einander entfernt, dann ist  $D_{ii}$  sehr klein, bei identischen Punkten wiederum 1.

Die Bewertung der Qualität der Symmetrie zweier Merkmale  $p_i$  und  $p_i$  ergibt sich schließlich aus allen Gewichten als Symmetriegrad M

$$M_{ij} = \Phi_{ij} S_{ij} D_{ij}$$
(2)

Durch die Wahl der Multiplikation als Verknüpfungsoperation wird gewährleistet, dass alle Bestandteile des Symmetriegrades in hohem Maße erfüllt sein müssen. Falls eine der Komponenten nahe an Null reicht, so wird auch der gesamte Symmetriegrad des entsprechenden Merkmals-Paares sehr klein. Bei einer Addition der Komponenten wäre dem nicht so: die zwei anderen Komponenten könnten den Verlust ausgleichen, was für das hier behandelte Problem nicht wünschenswert wäre.

#### 2.2 Ergebnisse der Symmetrie-Detektion

Die Polarkoordinaten der Symmetrieachsen der potentiell symmetrischen Merkmals-Paare werden, gewichtet mit ihrem Symmetriegrad M, in einem zweidimensionalen Histogramm akkumuliert. Aus den Maxima dieses Histogramms lassen sich direkt die dominanten Symmetrien des betrachteten Bildes ableiten. Abbildung 0 zeigt dieses Histogramm für das Beispiel aus Abbildung 0. Die hier gezeigte Fassade ist ausschließlich durch vertikale Symmetrien gekenn-

zeichnet. So zeigt das Histogramm ein globales Maximum bei ( $\theta = 90^\circ$ , r = 391pix) und mehreren lokale Nebenmaxima entlang der 90° Gitterlinie. Alle Spitzen, die durch mindestens drei Merkmals-Paare unterstützt werden, werden als Symmetrieachse für dieses Bild interpretiert.

Die Abbildung 0 f) zeigt alle fünf detektierten Symmetrieachsen im Überblick. Die Abbildungen a) - e) zeigen jeweils die Einzelergebnisse zusammen mit den konvexen Hüllen der für diese Symmetrie beteiligten Merkmalspunkte. Für dieses Beispiel wurden 1617 Merkmale detektiert und darunter 151 potentiell symmetrische Merkmals-Paare gefunden. Die Hauptsymmetrieachse (Abbildung 0 a) wird durch 34 Merkmals-Paare unterstützt.





Abbildung 0: 2D - Histogramm der Polarkoordinatenrepräsentation der Symmetrieach-



Abbildung 0: Ergebnisse der Symmetrie-Detektion. a) – e) Einzeldarstellung der gefundenen Symmetrien mit den konvexen Hüllen der beteiligten Merkmalspunkte. f) Gesamtdarstellung aller für dieses Beispiel gefundenen Symmetrien.

konvexe Hülle der an allen Symmetrien beteiligten Merkmale führt hier direkt zu der Bildregion, die durch symmetrische Strukturen gekennzeichnet ist.

## 3 Detektion wiederholter Strukturen

Die von Loy und Eklundh vorgestellte Idee, Merkmale innerhalb eines Bildes einander zuzuordnen und die gefundenen Paare zu clustern, haben wir für die Detektion sich wiederholender Strukturen adaptiert. Dafür sind nur einige wenige Änderungen erforderlich.

Zunächst entfällt offensichtlich die Spiegelung der Deskriptoren. D. h. die im Bild detektierten Merkmalspunkte werden untereinander zugeordnet, um Paare potentiell gleicher Merkmale zu finden.

Die in 2.1 vorgestellten Gewichtungen werden angepasst. Das Winkel-Symmetrie-Gewicht  $\Phi_{ij}$  vereinfacht sich damit zum Winkel-Gewicht  $\Phi_{ij}^* \in [-1,1]$ 

$$\Phi_{ij}^* = \cos(\varphi_i - \varphi_j) \qquad (3)$$

Womit diejenigen Merkmals-Paare den höchsten Support erhalten, die möglichst gleich orientiert sind. Die Gewichtungen in Abhängigkeit von Skalen-Differenz und Distanz bleiben unverändert. Damit ergibt sich die Bewertung der Qualität der Ähnlichkeit zweier Merkmale  $p_i$  und  $p_j$  wieder aus den Einzelgewichten als Repititionsgrad  $M^*$ 

$$M_{ij}^{*} = \Phi_{ij}^{*} S_{ij} D_{ij}$$
(4)

Die Clusterung der Merkmals-Paare über die Richtung ihre Verbindungslinie und den Betrag der Translation führt zu den dominanten Translationen im Bild und damit zu den wiederholten Strukturen.



Abbildung 0: Ergebnisse der Detektion wiederholter Strukturen, in Form der ersten fünf detektierten wiederholten Gruppen. Dargestellt sind die beteiligten Merkmalspunkte und ihre konvexen Hüllen.

#### 3.1 Ergebnisse der Detektion wiederholter Strukturen

Auch hier werden diejenigen Maxima des Histogramms als dominante Translation im Bild akzeptiert, die durch mindestens drei Merkmals-Paare unterstützt werden. Abbildung 0 zeigt die ersten fünf detektierten wiederholten Strukturen für dieses Beispiel. Dargestellt sind jeweils zwei Grup-

pen von Merkmalen und deren konvexe Hüllen. Alle Punkte einer Gruppe sind durch die gleiche Translation mit einem Punkt der anderen Gruppe verbunden.

Für dieses Beispiel wurden insgesamt 157 wiederholte Gruppen detektiert.<sup>2</sup> Zur Veranschaulichung dieser Ergebnisse zeigt Abbildung 0 alle detektierten Translationen als Plot von Translationsvektoren.<sup>3</sup>

Diese Darstellung zeigt deutlich die Regelmäßigkeit in den detektierten Translationen. Genau diese Regelmäßigkeit bzw. das Muster dahinter soll im Folgenden gefunden werden, um damit eine kompakte Beschreibung der Bildstruktur zu erhalten.



Abbildung 0: Die Translationsvektoren der 157 detektierten wiederholten Gruppen für das Bsp. aus Abbildung 0.

## 4 Ableitung einer kompakten Bildbeschreibung

Da wir mit entzerrten Bildern arbeiten, nehmen wir die Hauptrichtungen der Translationen als achsparallel an. Daher können wir die Suche nach einer geeigneten Basis getrennt auf die horizontale sowie vertikale Richtung beschränken.

Die beobachteten Translationen  $d_i$  (i = 1 : n) einer Richtung lassen sich somit als Linearkombinati-

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Wir haben unser Zuordnungskriterium mit distRatio = 0.9 sehr sensibel bzgl. Varianzen (Schatten, Gardinen etc.) der Fassadenobjekte gewählt. Damit führen auch noch relativ große Distanzen zwischen den Deskriptoren der Features zu einer positiven Zuordnung. Zu den Details der Parameter siehe Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Man beachte die unterschiedliche Skalierung der Achsen!

on von Basistranslationen  $v_k$  und der entsprechenden Koeffizienten  $\alpha_k$  durch

$$d_{i} = \sum_{k=1}^{K} (\alpha_{k} \cdot v_{k}) + \varepsilon_{i}; \quad w_{i}$$
(5)

beschreiben. Für das synthetische Beispiel aus Abbildung 0 mit K=2, ließe sich die Fassade in horizontaler Richtung (c) durch

$${}^{c}d_{i} = {}^{c}\alpha_{1} \cdot {}^{c}v_{1} + {}^{c}\alpha_{2} \cdot {}^{c}v_{2}$$
$$\max |{}^{c}\alpha_{1}| = 1 \quad \max |{}^{c}\alpha_{2}| = 2$$
(6)

beschreiben. Die Tiefe K der Basis-Hierarchie entspricht der Anzahl der Elemente der Linearkombination. A priori ist dieser Wert nicht bekannt, wir sind aber davon ausgegangen, dass typische städtische Fassaden in ihrer Komplexität den Wert 4 nicht überschreitet.

Weder die ganzzahligen Koeffizienten  $\alpha_k$  noch die reelwertigen Basistranslationen  $\nu_k$  sind bekannt. Jede Beobachtung  $d_i$  ist mit einem Residuum  $\varepsilon_i$  und einem Gewicht  $w_i$  behaftet, womit bspw. Ausreißer kontrolliert werden können.

Gesucht ist eine Basis, bestehend aus K Basiselemen-

ten, durch die die im Bild beobachteten Translationen bestmöglich zu erklären sind, unter Minimierung der Residuen und der Komplexität *K* der Lösung.

Da für dieses Problem keine direkte Lösung von uns gefunden wurde, haben wir uns für ein heuristisches Verfahren entschieden. Dafür bestimmen wir zunächst die Differenzen zwischen allen beobachteten Translationen. Die Spitzen im Histogramm dieser 2. Differenzen der Positionen ergeben potentielle Kandidaten für die gesuchten Basistranslationen. Für diese *n* Kandidaten bilden wir alle

 $M = \binom{n}{K}$  Kombinationen möglicher Basen  $v_K$  der Tiefe K = 1 : 4. Für jede dieser potentiellen Lö-

sungen  ${}^{j}v_{K}$  (j = 1 : M) werden für jede Beobachtung  $d_{i}$  die Koeffizienten  $\alpha_{k}$  bestimmt. Daraus ergibt sich für jede Lösung  ${}^{j}v_{K}$  ein Residuen-Vektor  ${}^{j}\boldsymbol{\varepsilon}$ 

Gesucht ist nun diejenige Lösung, die mit der geringsten Modellkomplexität die Beobachtungen am besten erklärt.

Aus der Informationstheorie lässt sich mit der minimalen Beschreibungslänge (MDL – Minimum Description Length) ein Kriterium ableiten, welches aussagt, wie viel Bit nötig werden, um eine bestimmte Information zu codieren. Wenn eine bestimmte Datenmenge sich durch ein kompaktes Modell beschreiben lässt, dann sind nur noch die Modellparameter und mögliche Abweichungen der Daten von diesem Modell zu codieren. Diese Überlegung führt zu dem in Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. vorgeschlagenen MDL-Kriterium



Abbildung 0: Synthetische Fassade, in vertikaler Richtung durch eine einfache Wiederholung gekennzeichnet Die horizontale Struktur lässt sich durch eine einfache Translation der Elemente der Doppelfenster und deren Beziehung wiederum durch eine weitere zweifache Translation beschreiben. Die kompakte Bildbeschreibung besteht in horizontaler Richtung somit aus einer Hierarchie (K=2) von Basiselementen mit dem Betrag der Translation und der Anzahl der Wiederholungen.

$$MDL = -\log \prod_{i=1}^{n} P(x_i | \hat{\theta}) + \frac{K}{2} \log(n) \quad . \tag{7}$$

MDL gibt die zur Codierung des Modells  $(\hat{\theta}, K)$  minimal benötigte Anzahl von Bits an. Gesucht ist das jenige Modell $(\hat{\theta}, K)$ , das mit der geringsten Komplexität *K* und der größten Datenwahrscheinlichkeit  $\prod_{i=1}^{n} P(x_i | \hat{\theta})$  die beobachteten Daten  $x_i$  beschreibt.

Unter der Annahme normal verteilter Abweichungen der Beobachtungen vom Modell lässt sich das Kriterium darstellen mit

$$MDL = \frac{1}{2}\Omega + \frac{K}{2}\log(n) \quad . \tag{8}$$

Die Berücksichtigung von Ausreißern erfolgt nach Huber (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) mit der Optimierungsfunktion

$$\rho(\varepsilon) = \begin{cases} T^2 & falls \quad \left(\varepsilon/\sigma\right)^2 \ge T^2 \\ \left(\varepsilon/\sigma\right)^2 & falls \quad \left(\varepsilon/\sigma\right)^2 < T^2 \end{cases} \quad \text{und} \quad \Omega = \sum_{i=1}^n \rho(\varepsilon_i) \quad . \tag{9}$$

Entsprechend den typischerweise für Hypothesentests verwendeten Signifikanzniveaus wählen wir den Schwellwert für Ausreißer zu  $T = 3 \cdot \sigma$ , mit  $\sigma = 1.5$ .

Die konvexen Hüllen der Merkmals-Paare, die das gewählte Modell  $v_K$  unterstützen, definieren die Bereiche im Bild die durch genau diese Basiselemente zu beschreiben sind. Damit sind wir, in



Abbildung 0: Ergebnisse der Bestimmung der kompakten Bildbeschreibung. Links: gefundenen Basiselemente, manuell platziert. Die Anzahl der Wiederholungen der Basisvektoren ist durch die bei der Bestimmung der Linearkombinationen der Basisvektoren für die Beobachtungen maximal auftretenden Koeffizienten gegeben. Mitte/ Rechts: Regionen die durch die vertikalen/ horizontalen Basiselemente zu beschreiben sind, mit dem jeweiligen Basisvektor.

Form von Basiselementen und den zugehörigen Bereichen im Bild, zu der von uns gesuchten minimalen Bildbeschreibung gelangt.

Abbildung 0 zeigt die Ergebnisse der Bestimmung der kompakten Bildbeschreibung für zwei Fassadenaufnahmen. Für das Beispiel aus Abbildung 0 wurden für beide Achsrichtungen einfache Basen ermittelt. Die konvexen Hüllen der an diesen Basen beteiligten Merkmale bedecken den gesamten Fassadenbereich, mit Ausnahme der vom Baum verdeckten Bereiche.

Abbildung 0 unten zeigt ein Beispiel einer hierarchischen Basis in horizontaler Richtung. Der Struktur der Fassade entsprechend, wurde ein Basiselement ermittelt, das die eng beieinander liegenden Fensterreihen verbindet und ein weiteres Basiselement, welches die Doppelfensterreihen verbindet.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Wir haben gezeigt, wie der Ansatz von Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. auf die Detektion multipler wiederholter Gruppen erweitert werden kann. Aus diesen von uns detektierten Translationen im Bild haben wir über ein Suchverfahren und das Kriterium der minimalen Beschreibungslänge ein Modell zur kompakten Bildbeschreibung abgeleitet.

Die gezeigten Beispiele beziehen sich auf Bilder, die fast ausschließlich den regelmäßigen Teil von Fasaden zeigen. Durch die sehr großzügige Wahl des Zuordnungskriteriums ist das Verfahren zum einen sehr sensibel für die wiederholten Objekte im regelmäßigen Teil der Fassade, aber zum anderen auch für ähnliche Merkmale am Rande derselben. Insofern ist die Bestimmung des Modells zur kompakten Bildbeschreibung noch weiter zu verfeinern, insbesondere im Hinblick auf die Robustheit gegen Störungen im Bild.

## 6 Literaturverzeichnis

- FÖRSTNER, W., 1989: Image Analysis Techniques for Digital Photogrammetry. In: Vorträge der 42. Photogrammetrischen Woche an der Universität Stuttgart 1998, Schriftreihe Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 13, pp. 205-221.
- LOWE, D. G., 2004: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. International Journal of Computer Vision, 60(2): 91–110.
- LOY, G. AND EKLUNDH, J.-O., 2006: Detecting Symmetry and Symmetric Constellations of Features. In Leonardis, A., Bischof, H., and Pinz, A., editors, Proceedings of ECCV 2006, volume II, pages 508–521. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. LNCS 3952.
- RISSANEN, J., 1989: Stochastic Complexity in Statistical Inquiry. Series in Computer Science -Vol. 15; World Scientific.
- SCHAFFALITZKY, F. AND ZISSERMAN, A., 2000: Planar Grouping for Automatic Detection of Vanishing Lines and Points. In: Image and Vision Computing, 2000, vol. 18, pages 647-658.
- WENZEL, S., 2006: Detektion wiederholter und symmetrischer Strukturen von Objekten in Bildern. Diplomarbeit. Institut für Geodäsie und Geoinformation, Fachbereich Photogrammetrie, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.

# Die Ableitung von Forstinventurparametern aus digitalen Luftbildkameradaten

#### MANUELA HIRSCHMUGL, BEATE WENINGER, HANNES RAGGAM & MATHIAS SCHARDT<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Die vorliegende Arbeit gibt einen Einblick in die Methoden und Ergebnisse der Verwendung der digitalen Flächenkamera UltracamD für die Ableitung forstlich relevanter Parameter. Nach einem Überblick über die bereits erreichten Ergebnisse im Bereich von Einzelbaumerkennung und der Ableitung von Baumhöhen wird in dieser Studie speziell auf die Klassifizierung von Baumarten aus digitalen Luftbildkameradaten eingegangen. Die spektralen Merkmale von fünf Baumarten werden im phänologischen Verlauf untersucht und ihre Trennbarkeit zu den einzelnen Zeitpunkten evaluiert.

## 1 Einleitung und Ergebnisse aus früheren Studien

Eine der ersten Anwendungen von konventionellen Luftbildern war die Gewinnung von Informationen über den Wald. Mit dem Einzug digitaler Kamerasysteme in die Luftbildphotogrammetrie war es daher naheliegend, dass die Untersuchung der Anwendungsmöglichkeiten neuester Sensoren für die Forstwirtschaft auf reges Forschungsinteresse trifft.

Ansätze zur Detektion von Einzelbäumen, Kronendelinierung und Baumartenbestimmung wurden in den letzten Jahren mit verschiedenen Datensätzen durchgeführt. Einige Beispiele sind: basierend auf gescannten Farbinfrarotbildern (CIR): PINZ (1989), PITKÄNEN (2001); basierend auf compact airborne spectrometer imager (CASI) Daten: GOUGEON et al. (1999); LECKIE et al. (1999) oder unter Verwendung von multidetector electro-optical imaging sensor (MEIS) Daten: GOUGEON (1995). Ein Vergleich der Ableitung von Forstparametern aus verschiedenen Daten (Luft-, bzw. Satellitenbilder, Laserscannerdaten) ist in HYYPPÄ & HYYPPÄ (1999) zu finden. Zur Ableitung der Baumhöhe wurden in den letzten Jahren viele Studien basierend auf Laserscanner Daten durchgeführt, z. B. SCHARDT et al. (2002); HYYPPÄ et al. (2003); KOCH et al. (2006). Mit Laserscannerdaten ist es möglich, neben der Ableitung der Kronenoberfläche auch detaillierte Geländemodelle unter der Waldkrone abzuleiten.

Für die Ableitung der Kronenoberfläche können jedoch alternativ auch Stereoauswertungen zur Anwendung kommen. Steht nun ein ausreichend genaues Geländemodell zur Verfügung, so kann aus deren Kombination ebenfalls die Baum- bzw. Bestandeshöhe ermittelt werden. Digitale Kameradaten sind für die Stereoauswertung besonders gut geeignet, da sie durch die schnelle Bildaufnahmerate in der Lage sind, denselben Punkt auf der Erdoberfläche nicht nur in zwei, sondern in mehreren Bildern abzubilden. Frühere Studien in den vorliegenden Testgebieten zeigten bereits gute Ergebnisse im Bereich der Ableitung von digitalen Oberflächemodellen aus solchen mehrfach überlappenden Stereobildern (OFNER et al. 2006; HIRSCHMUGL et al. 2007). Im Testgebiet *Burgau* zeigte eine Analyse von 356 Bäumen der obersten Schicht eine mittlere Abweichung von 0,77 m (Standardabweichung: 2,39 m). Im Vergleich dazu wurde aus zwei

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>JOANNEUM RESEARCH, Institut für Digitale Bildverarbeitung, Wastiangasse 6, 8010 Graz, Österreich

Stereopartnern (Simulation einer konventionellen Aufnahme mit 60% Überlappung) eine mittlere Genauigkeit von 1,34 m bei einer Standardabweichung von 4,52 m erreicht. Im Testgebiet *Graz* wurde ebenfalls ein Oberflächenmodell aus mehrfach überlappenden Bildern generiert und für 63 einzeln stehende Bäume eine mittlere Abweichung von 1,16 m mit einer Standardabweichung von 1,94 m erreicht. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Erfassung von Einzelbaumhöhen mit Hilfe eines detaillierten Geländemodells und eines DOMs aus mehrfach überlappenden Stereobildern mit einer Genauigkeit von etwa einem Meter möglich ist, sofern der zu messende Baum in den Daten sichtbar ist. Die erzielte Genauigkeit entspricht somit etwa jener von Laserscanner Daten (abhängig von der Punktdichte) bzw. auch jener von terrestrischen Messmethoden, wie sie in der Forstwirtschaft eingesetzt werden (VERTEX III, siehe BARRON, 2001).

Auf Basis der generierten Vegetationshöhenmodelle bzw. Orthophotos wurden verschiedene Methoden zur Einzelbaumerkennung getestet. Die Ergebnisse (HIRSCHMUGL et al., 2007) zeigen sehr unterschiedliche Genauigkeiten, die stark vom Waldtyp und von der verwendeten Methodik abhängig sind. Weiters wurde bestätigt, dass Einzelbaumdetektion in sehr jungen Beständen sowie in Laubwaldbereichen schwieriger ist als in nadelwalddominierten Baumholz-Beständen. Neben der Information über Baumanzahl und -höhe ist die Baumart ein weiterer wichtiger

Parameter. Der Schwerpunkt in dieser Arbeit wird daher auf die Klassifizierung der Baumart aus Ultracam Daten im Testgebiet *Graz* gelegt.

# 2 Daten und Testgebiete

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Charakteristika der UltracamD im Allgemeinen und über die Daten des Testgebiets *Graz* in der Steiermark (Österreich) im Besonderen. Das Testgebiet liegt im nordöstlichen Stadtrandgebiet im Bezirk *Mariatrost* und umfasst neben dem Siedlungsraum Teile des Naherholungsgebietes *Leechwald*. Dieses Gebiet wird von der Firma Vexcel-Microsoft für die Kalibrierung der Ultracam Kameras verwendet und wird daher häufig beflogen. In der vorliegenden Arbeit wird die spektrale Reflexion einzelner Baumarten im jahreszeitlichen Verlauf untersucht. Für diese Analyse wurden Geländeaufnahmen zur eindeutigen Identifizierung der Bäume durchgeführt.

# 3 Methode

Diese Studie ist von besonderem Interesse, da aus Kostengründen selten mehrere hoch auflösende Datensätze innerhalb eines Jahres für dasselbe Gebiet für Auswertungen zur Verfügung stehen. Im Testgebietes Graz ist jedoch gerade das der Fall, da die Firma VEXCEL – MICROSOFT dort die Kalibrierungsflüge ihrer Kamera (UltracamD, UltracamX) durchführt. Es liegen vier Zeitpunkte (April, Mai, Juli und September) für die Analyse der spektralen Reflexion der einzelnen Baumarten vor (siehe Tabelle 1). Für die Bearbeitung wurden die multispektralen "Level-2" Daten gewählt, da diese ein Minimum an Vorverarbeitung (keine Spektralanpassung, kein Pansharpening) aufweisen. Dies ist wichtig, um möglichst die unverfälschten Reflexionswerte der einzelnen Baumarten zu analysieren. Die Auswirkungen von Pansharpening Methoden auf die Reflexionswerte wurde in HIRSCHMUGL et al. (2005) untersucht.

Charakteristika der UltracamD Kamera								
Sensor		UltracamD						
Bildgröße panchromatisch		11500 x 7500 pixels						
Brennweite panchromatisch		100 mm						
Bildgröße multispektral		4008 x 2672 pixels						
Brennweite multispektral		28 mm						
Angle-of-view from vertical, cross track (along track)		55 ° (37 °)						
Panchromatische / multispektrale Pixelgröße (physikalisch)		9 µm						
Spektrale Auflösung		pan: 390 – 690 nm; blue: 390 – 530 nm; green: 470 – 660 nm; red: 570 – 690 nm; near infrared: 670 –						
Radiometrische Auflösung		12 bit						
Minimale Zeit zwischen den Auslösungen		0.74 Sekunden						
Minimale Zeit zwischen der	n Auslösungen		0.74 Se	kunden				
Minimale Zeit zwischen der Testgebiet	n Auslösungen Graz		0.74 Se	kunden				
Minimale Zeit zwischen der Testgebiet Aufnahmedatum	Graz 21.04.2005	24.05.2005	0.74 Se	kunden 22.07.2005	09.09.2005			
Minimale Zeit zwischen der Testgebiet Aufnahmedatum Geometrische Auflösung	Graz           21.04.2005           pan: ~ 7.5 cm; ms: ~	24.05.2005 - 25 cm	0.74 Se	kunden 22.07.2005	09.09.2005			
Minimale Zeit zwischen der Testgebiet Aufnahmedatum Geometrische Auflösung Belichtungszeit	Graz 21.04.2005 pan: ~ 7.5 cm; ms: ~ 1/350	24.05.2005 - 25 cm 1/350	0.74 Se	kunden 22.07.2005 1/350	09.09.2005			
Minimale Zeit zwischen der Testgebiet Aufnahmedatum Geometrische Auflösung Belichtungszeit Blende	Graz 21.04.2005 pan: ~ 7.5 cm; ms: ~ 1/350 8	24.05.2005 - 25 cm 1/350 5.6	0.74 Se	22.07.2005 1/350 8	09.09.2005 1/500 8			
Minimale Zeit zwischen der Testgebiet Aufnahmedatum Geometrische Auflösung Belichtungszeit Blende Zeitpunkt der Aufnahme	Graz 21.04.2005 pan: ~ 7.5 cm; ms: ~ 1/350 8 14:34:11	24.05.2005 - 25 cm 1/350 5.6 18:25:02	0.74 Se	22.07.2005 1/350 8 13:12:05	09.09.2005 1/500 8 10:13:33			
Minimale Zeit zwischen der Testgebiet Aufnahmedatum Geometrische Auflösung Belichtungszeit Blende Zeitpunkt der Aufnahme Flughöhe über Grund	Graz 21.04.2005 pan: ~ 7.5 cm; ms: ~ 1/350 8 14:34:11 ~ 800 - 1000 m	24.05.2005 - 25 cm 1/350 5.6 18:25:02	0.74 Se	22.07.2005 1/350 8 13:12:05	09.09.2005 1/500 8 10:13:33			

#### Tab. 1: Datencharakteristika

Für die Untersuchung der Reflexionswerte sollten Baumkronen als Objekte anstatt Einzelpixel behandelt werden. Die Abgrenzung der Baumkronen kann durch verschiedene, automatisierte Segmentierungsverfahren erfolgen, wie sie beispielsweise in GOUGEON (1995); LECKIE et al. (1999) oder KOCH et al. (2006) vorgestellt wurden. In dieser ersten Phase der Analyse wurde davon allerdings Abstand genommen, um zu vermeiden, dass Fehler in der Kronensegmentierung die spektrale Analyse beeinflussen. Anstatt dessen wurde ein manueller Ansatz gewählt: in jedem der vier Datensätze wurden etwa 20 Bäume jeder der vorhandenen Baumarten (Fichte, Kiefer, Lärche, Eiche, Buche) ausgewählt, deren Lage und Baumart im Feld verifiziert und die beleuchteten Kronenteile deliniert. Für jeden Zeitpunkt wurden dieselben Bäume in zwei nacheinander aufgenommenen Luftbildern eingezeichnet. Dieses Setup wurde gewählt, um die folgenden drei zentralen Fragen zu beantworten:

- 1) Wie unterscheiden sich die einzelnen Baumarten spektral in den digitalen Daten?
- 2) Wie stabil sind die Reflexionseigenschaften der einzelnen Baumarten
  - a. einerseits in verschiedenen Bildern eines Fluges und
  - b. andererseits zu den verschiedenen Zeitpunkten?
- 3) Wie ändert sich das Spektralverhalten jeder Baumart in ihrer phänologischen Entwicklung?

Die Analysen wurden anhand der manuell eingezeichneten Kronen durchgeführt. Bei der Auswertung zeigte sich einmal mehr die Notwendigkeit der objektbasierten Verarbeitung: die Trennbarkeit der Baumarten steigerte sich von einer mittleren Jeffreys-Matusita Distanz (siehe ERDAS FIELD GUIDE, 2001) über alle Baumarten vom dimensionslosen Wert 1079 bei pixelbasierter Berechnung auf 1343 bei objektbasierter Auswertung. Der Großteil der Auswertungen wurde im Programm Erdas Imagine durchgeführt.

#### 4 Ergebnis der spektralen Analyse

Bezugnehmend auf die eingangs definierten Fragen konnte folgendes festgestellt werden:

#### Ad 1) Spektrale Unterscheidbarkeit

Die Ergebnisse der spektralen Analyse zeigen, dass die einzelnen Baumarten nicht zu allen Zeitpunkten gleich gut trennbar sind. Besonders gilt dies für die Laubbaumarten Buche und Eiche, die generell spektral sehr ähnliche Charakteristika zeigen. Diese lassen sich in den Daten von Mai und September deutlich besser trennen als im Juli (siehe Abbildung 1). Der Grund liegt im Zeitpunkt von Blattaustrieb bzw. Blattverfärbung, der für die einzelnen Baumarten unterschiedlich ist. Im Juli, zur Zeit des vollen Laubs hingegen, sind Buche und Eiche spektral sehr schwer unterscheidbar (Abb. 1b). Hinsichtlich der Nadelbaumarten wurde die beste Differenzierbarkeit in April gefunden, wovon angenommen werden kann, dass dies ebenfalls mit dem winterlichen Nadelverlust und dem erneuten Austrieb der Lärche zusammen hängt. Für alle Baumarten gemittelt zeigten die Mai-Daten die beste Differenzierbarkeit.



Abbildung 1 Spektrale Signaturen der Baumarten im den Daten von (a) Mai und (b) Juli. Band 4 = NIR; Band 1 = ROT.

#### Ad 2a) Lage im Merkmalsraum in verschiedenen Bildern desselben Fluges

Diese Frage kann nicht eindeutig beantwortet werden, da die einzelnen Datensätze unterschiedliche Ergebnisse lieferten. In drei der vier Flüge war die Spektralinformation konsistent, d. h. die einzelnen Baumarten, abgeleitet aus verschiedenen Bildern eines Fluges, bildeten gemeinsame Cluster. Daraus würde folgen, dass einmal abgeleitet Trainingsgebiete auch für anschließende Bilder verwendet werden könnten, was speziell für die automatisierte Auswertung größerer Flächen einen unschätzbaren Vorteil bringt. Allerdings gab es auch eine Ausnahme, in der die Reflexionen je nach Bild eigene, voneinander getrennte Cluster bildeten. Solche "offsets" könnten jedoch mit Methoden radiometrischer Anpassung korrigiert oder zumindest vermindert werden.

Dieser Punkt muss also für jeden Flug im Einzelnen geklärt und anschließend entschieden werden, ob eine radiometrische Anpassung zwischen den Bildern notwendig ist oder nicht. Wie bereits erwähnt, wurden in dieser Studie ausschließlich Rohdaten ohne vorherige Anpassung verwendet.

#### Ad 2b) Lage im Merkmalsraum zu verschiedenen Zeitpunkten

Diese Frage entstand auf Basis von Ergebnissen einer schwedischen Studie (BOHLIN et al., 2006) an digitalen Kameradaten, bei der die Baumarten sich im spektralen Merkmalsraum instabil verhielten. So reflektierten bei BOHLIN et al. beispielsweise die Fichten im Oktober im grünen Spektralbereich tendenziell höher als die Kiefern, während im Juni das Verhalten umgekehrt war. Im Gegensatz dazu blieben diese Verhältnisse in der vorliegenden Studie jedoch erhalten, das heißt, die Kiefern reflektieren im Mittel im grünen und auch im NIR Kanal zu allen Zeitpunkten höher als die Fichten (siehe Abbildung 2). Dies gilt allerdings nur, wenn Bäume gleicher Altersklassen verglichen werden. Jüngere Fichten können demgegenüber jedoch auch höhere Reflexionen im nahen Infrarot aufweisen als Kiefern, in der vorliegenden Studie wurde dies in den Mai Daten beobachtet (siehe Abbildung 2d).

#### Ad 3) Phänologische Entwicklung

Auf Basis der vier Zeitpunkte wurde das Reflexionsverhalten untersucht, das jedoch neben der phänologischen Entwicklung auch von einer Vielzahl weiterer Einflüsse abhängig ist. GUYOT et al. (1989) unterteilen für die Auswertung geringer auflösende Satellitendaten die Faktoren in (1) externe Faktoren (1.1. Größe der abgebildeten Fläche, 1.2. Sonnenhöhe, 1.3. Blickwinkel, 1.4. Bewölkung und 1.5. Wind) und in (2) interne Faktoren, wie 2.1. Orientierung der Pflanzreihen, 2.2. Bodenbeschaffenheit und 2.3. geometrische Struktur der Bäume. Viele dieser Faktoren sind nicht gültig, wenn es sich, wie im vorliegenden Fall, um sehr hochauflösende Daten handelt (1.1.; 1.5.; 2.1.; 2.2. und 2.3.), andere sind nicht von Bedeutung, wenn nur der jeweils beleuchtete Teil der Baumkrone für den Vergleich verwendet wird (1.5.). Nachdem für die Studie außerdem jeweils Bilder mit möglichst ähnlichem Blickwinkel ausgesucht wurden, ist auch der Faktor Blickwinkel (1.3.) zu vernachlässigen. Es bleiben also für die vorliegende Studie die Einflussfaktoren Sonnenhöhe und Bewölkung/Dunst, sowie die unterschiedlichen Einstellungen der Kamera (Blende und Belichtungszeit; siehe Tabelle 1). Letztere können linear normalisiert werden, als Basis wurde Blende 8 und eine Belichtungszeit von 1/350 gewählt, sodass nur die Daten von Mai und September angepasst werden mussten. Abbildung 2 zeigt die Reflexionsverläufe vor und nach der Normalisierung für den grünen bzw. infraroten

Spektralbereich. Während sich im nahen Infrarot bereits eine realistische Phänologiekurve mit ansteigendem Reflexionsverhalten im Frühjahr, Maximum um Sommer und anschließender Abnahme im September zeigt (Abb. 2d), ist das Normalisierungsergebnis im grünen Band nicht realistisch (Abb. 2b).



(a) grüner Kanal vor Normalisierung

(b) grüner Kanal nach Normalisierung





(d) infraroter Kanal nach Normalisierung

Abbildung 2: Reflexionskurven (jeweils zwei Bilder pro Zeitpunkt) vor (a bzw. c) und nach (b bzw. d) der Normalisierung der Kameraeinstellungen (Blende und Belichtungszeit)

Dieser unterschiedliche Effekt im sichtbaren bzw. infraroten Spektralbereich legt die Vermutung nahe, dass zusätzlich noch atmosphärische Einflüsse und Sonnenstand das Reflexionsverhalten beeinflussen. Die mittlere tägliche Bewölkung (Tab. 3) als Maß für den atmosphärischen Zustand ist sicherlich nicht ausreichend und weist auch keinen entsprechenden Zusammenhang mit den Reflexionsverhalten auf. Außerdem wurde beim Flug auf gute Sicht Wert gelegt. Der Aerosolgehalt der Luft wäre jedoch ein interessanter Faktor, für den jedoch keine Daten zur Verfügung stehen. Im Gegensatz dazu ist der Sonnenstand einfach zu berechnen. Tabelle 3 zeigt die Sonnenhöhe zum Zeitpunkt der einzelnen Aufnahmen. Der niedrige Sonnenstand im Mai und der sehr hohe im Juli korrelieren stark mit der Kurve in Abbildung 2b. Hier wäre eine detaillierte, topographische Korrektur notwendig, um die einzelnen Werte direkt vergleichen und dadurch die Phänologie als einzigen verbleibenden Faktor analysieren zu können.

	April	Mai	Juli	September
Mittlere tägliche Bewölkung in %	43	57	90	60
Sonnenhöhe zum	48.3°	18.1°	63°	36.8°

Tab. 2: Bewölkung und Sonnenstand zu den Akquisitionszeitpunkten

## 5 Zusammenfassung

Basierend auf Ergebnissen früherer Studien kann davon ausgegangen werden, dass Baumhöhen mit eine Genauigkeit von etwa einem Meter aus mehrfach überlappenden Bildern generiert werden können, sofern ein ausreichend genaues Geländemodell zur Verfügung steht. Die Detektion von Einzelbäumen ist sehr stark von der Bestandesstruktur und von der Baumart abhängig. Obwohl bereits gute Ergebnisse hinsichtlich der "richtigen Erkennung" erreicht wurden, ist der Anteil an zusätzlich (falsch) erkannten Bäume für einen operationellen Einsatz in mitteleuropäischen Wäldern mit starker Heterogenität, hohem Laubanteil und eher geringem Durchforstungsgrad derzeit noch recht hoch. Hier ist noch Entwicklungsbedarf gegeben. Tests in Skandinavien zeigen dort aufgrund homogenerer Waldstrukturen bessere Ergebnisse.

Bezüglich der Verwendung von digitalen Kameradaten für die spektrale Klassifikation von Baumarten konnte in dieser Studie gezeigt werden, dass die Wahl des Aufnahmezeitpunktes die Trennbarkeit der Klassen deutlich beeinflussen kann. Weiters wurde bestätigt, dass die Einbeziehung des Baumalters für die Baumartenklassifikation notwendig ist, um die Charakteristika der einzelnen Baumarten untereinander zu den unterschiedliche Zeitpunkten möglichst konstant zu halten. Für eine weiterführende Analyse der phänologischen Entwicklung müssen die einzelnen Bilder noch topographisch normalisiert werden, um den unterschiedlichen Sonnenstand auszugleichen.

## Danksagung

Die Autoren danken Herrn Michael Gruber von VEXCEL-MICROSOFT für die Bereitstellung der Daten zur multitemporalen Analyse.

## 6 Literaturverzeichnis

BARRON, R. J., 2001: Precision of three tree height measuring devices in forest conditions.

- available at: http://www.forestserviceni.gov.uk/publications/research\_notes/research\_note\_no\_1\_2001.pdf. BOHLIN, J., OLSSON, H., OLOFSSON, K. & WALLERMAN, J., 2006: Tree species discrimination by
  - aid of template matching applied to digital air photos. In T. Koukal and W. Schneider, (Editors): Proc. of Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry, pp. 199–203, Vienna.

ERDAS FIELD GUIDE, 2001, 5. Auflage ERDAS IMAGINE inc., Atlanta.

- GOUGEON, F. A., 1995: A crown-following approach to the automatic delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images. Canadian Journal of Remote Sensing – Special Issue on Aerial Optical Remote Sensing, 21:274–282.
- GOUGEON, F. A., LECKIE, D., SCOTT, I. & PARADINE, D., 1999: Individual tree crown species recognition: the nahmint study. In D. A. Hill and D. G. Leckie, editors, Proceedings of the Int'l Forum on Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry, pp. 209–223, Victoria, British Columbia, Canada, February 10-12, 1999.
- GUYOT, G., GUYON, D. & RIOM, J., 1989: Factors affecting the spectral response of forest canopies: A review. Geocarto International, 4:3–18
- HIRSCHMUGL, M., GALLAUN, H., PERKO, R. & SCHARDT, M., 2005: Pansharpening Methoden für digitale, hochauflösende Fernerkundungsdaten. In: Strobl/Blaschke/Griesebner (Eds.): Angewandte Geoinformatik 2005. Proc. AGIT Symposium, Salzburg. Verlag Wichmann, Heidelberg, pp. 270-276.
- HIRSCHMUGL, M., OFNER M., RAGGAM, J. & SCHARDT, M., 2007: Single Tree Detection in Very High Resolution Remote Sensing Data, Remote Sensing of Environment (in print).
- HYYPPÄ, H. & HYYPPÄ, J., 1999: Comparing the accuracy of laser scanner with other optical remote sensing data sources for stand attributes retrieval. The Photogrammetric Journal of Finland, 16:5–15.
- HYYPPÄ, J., HYYPPÄ, H., MALTAMO, M., YU, X. W., AHOKAS, E. & PYYSSALO, U., 2003: Laser scanning of forest resources - some of the finnish experience. Proc. of the SCANDLASER Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests, pp. 53–59, Umeå, Sweden.
- KOCH, B., HEYDER, U. & WEINACKER, H., 2006: Detection of individual tree crowns in airborne lidar data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 72(4):357–363.
- LECKIE, D., BURNETT, C., NELSON, T., JAY, C., WALSWORTH, N., GOUGEON, F. & CLONEY, E., 1999: Forest parameter extraction through computer-based analysis of high resolution imagery. Proceedings of Fourth Int. Airborne Rem. Sens. Conf. and Exh. / 21st Canadian Symposium of Remote Sensing, vol. 2, pp. 205–213, Ottawa, CA, June, 21-24.
- OFNER, M., HIRSCHMUGL, M., RAGGAM, H. & SCHARDT, M., 2006: 3d stereo mapping by means of UltracamD data. In Proceedings of 3d Forestry Scientific Workshop, published online.
- PINZ, A., 1989: Final results of the vision expert system ves: Finding trees in aerial photographs. Wissensbasierte Mustererkennung, OCG-Schriftenreihe, 49:90–111. Oldenbourg.
- PITKÄNEN, J., 2001: Individual tree detection in aerial images by combining locally adaptive binarization and local maxima methods. Canadian Journal of Forest Research, 31(5):832– 844.
- SCHARDT, M., ZIEGLER, M., WIMMER, A., WACK, R., & HYYPPÄ, J., 2002: Assessment of forest parameters by means of laser scanning. In Proceedings of the ISPRS Commission III Symposium, pp. 302–309.

# Image pre-processing and vector extraction of paths and hicking trails

# J. GASSER<sup>1</sup> & F. GERVAIX<sup>1</sup>

Abstract: The goal of this thesis is to find a methodology intended to allow a semi-automatic extraction of the paths and hiking trails from ADS40 color and near infra-red ADS40 images. Research was carried out on several image processing software allowing an acquisition of the desired information in vector form. The choice was thus made on ERDAS IMAGINE 9.1, and more particularly one of its new modules called "Easytrace". Then, a series of tests was carried out in order to evaluate the use of this module, on the qualitative as well as the quantitative level. Some tests of pre-treatment of the images were carried out and tested, so as to evaluate the profit that they could bring to the use of Easytrace. A new method named NDRI (Normalized Difference Road Index) was developed, combining the radiometric values of the available images particularly. It was tested in combination with Easytrace in a very satisfactory way since it even improves the performances of the latter. Finally, suggestions were made in order to mitigate a few encountered issues (e.g. DTM accuracy, flight's period of the year).

# 1. Context

#### 1.1 ADS40 principle

The ADS40 is a particularly effective product of Leica Geosystems for airborne image acquisition in the fields of photogrammetry and remote sensing. Its principle of operation is to separate the light according to four accurate spectral bands (R, G, B + NIR) which are acquired simultaneously and according to different angles (forward, nadir and backward). Moreover, the digital nature of this data makes it possible to store it permanently without the fear of quality losses due to time.

Thanks to these multiple linear CCD arrays, it is thus possible to combine the accuracy of photogrammetry with the diverse possibilities of qualitative or quantitative studies of remote sensing. The technology used by the ADS40, in addition to making of it a measuring instrument to the metric direction of the term, opens new horizons by the combination of its spatial accuracy and resolution to its possibilities of remote sensing. The images obtained by the superposition of the data recorded in flight (panchromatic, RGB and NIR), revealed in a more pronounced way certain objects hitherto almost invisible.

#### 1.2 Simultaneity and permanence

The acquisition of the layers of information is simultaneous, which was hitherto impossible with analogic films. This advancement there is particularly important since it determines the cost of obtaining the data. The permanence of the data is also an important factor which is guaranteed. The risk of deterioration of the data is to be feared only in the event of bad handling and is thus to be a negligible risk if one considers the current possibilities in terms of backup and archiving.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> HEIG-VD, Geomatics Faculty, Yverdon-les-Bains, Switzerland Joel.Gasser@alumni-heig-vd.ch, Francois.Gervaix@heig-vd.ch

# 2. Problems

#### 2.1 Software

The objective of this project is to provide an evaluation of the contribution of infra-red information in the semi-automatic acquisition of paths and hiking trails. In this respect, software had to be found able to treat the raw data with provision like extracting the information desired in vector form.

#### 2.1.1 Leica Geosystems' ERDAS IMAGINE 9.1

ERDAS IMAGINE 9.1 is a type of professional software intended for photogrammetric applications and aerial and satellite image processing. This last version includes a new module called «Easytrace» which consists of help with the extraction of linear and regular objects by decreasing the number of mouse clicks necessary. By obtaining the vector information of a digital source, such as the satellite images or aerial photography, the traditional digitalization requires for the user to frequently place posts along a border of a road or a given extent. Easytrace module automatically adds points in the operator preset zone to facilitate the extraction of the linear or polygonal objects by reducing the time necessary for this capture or update.

#### 2.2 Influence criteria on the quality of the result

- 1. Topography result: The slope of the ground plays a great role in the representation of the landscape. In the most unfavourable cases, certain zones can thus miss details and be prejudicial in the extraction of desired information.
- 2. Forest covering: It is the principal restrictive factor of the extraction of the paths and hiking trails. Indeed, with the trees hiding the latter, it is not possible to recover missing information. The densely covered zones are thus unusable.
- 3. Shadows: It is obvious that the interpretation of air images can be made more difficult if the objects are greatly shadowed. It is even truer for the problems developed in this report. Indeed, the extraction being based mainly on the changes of radiometry can be disturbed by the shadows which are pass off as "phantom" objects which don't exist.
- 4. Built up area: Buildings can lead to mistakes in the interpretation of the treatment software and make it thus more difficult to obtain the desired extraction.
- 5. Sinuosity: The sinuosity of the paths and hiking trails of which one seeks to make the restitution is also an important factor, since it is the sinuosity which makes the automation of the process paramount.

# 3. NDRI pre-processing

The numerical nature of the data of remote sensing lends itself particularly well to operations between channels. The principle of the latter is to carry out, for each pixel, complex mathematical operations, utilizing the numerical values observed for these pixels in the various spectral bands.

## 3.1 NDRI

Inspired by the well-known NDVI ("Normalized Difference Vegetation Index") and its combination of red and near infra-red bands, the operation principle of the NDRI is also based on the differences in reflectivity of the paths and hiking trails in the <u>green</u> spectral and near

infra-red bands. This combination was found as the most effective in order to differentiate "untouched" ground from "circulated" ground.

Indeed, of the images representing the green band (535-585nm), one notes that the paths and hiking trails have a very marked response and thus value of high radiometry. On the other hand, the images representing the band of near infra-red relation (835-885nm), is the opposite. The circulation corridors (mechanized and pedestrians) belong to the darkest objects which indicates a low value of radiometry.

The result obtained by NDRI pretreatment emphasizes the circulation corridors (as well as the roofs of the buildings and the rivers), since their representations are the only ones which obtain a low value of radiometry (color dark grey - black). The result thus resembles an aerial image taken after a period of snow falls where one would have cleared the paths and hiking trails.

$$NDRI = \frac{(pIR - G)}{(pIR + G)}$$
(1)

Where: pIR: radiometric value of the pixel in the band near infra-red (835-885nm). G: radiometric value of the pixel in the green band (535-585nm).

#### 3.2 NDRI advantages for operator

The manual vectorization of the paths and hiking trails is an both time-consuming and meticulous. Being able to reduce this work is beneficial for both the operator and his employer, since the cost of this vectorization is some what decreased.

The use of the NDRI is thus an advantage for several reasons. It makes it possible to increase the information which interests us while decreasing possible mistakes in interpretation with regard the geometry of the objects represented. Consequently, the comfort of using a coloured image is compensated by the symbiosis observed between the pretreatment by NDRI and the use of the Easytrace module.

With the various methods employed, one thus notes that only two principal factors influence the productivity of this work in a notable way:

- The use of the module Easytrace of ERDAS IMAGINE 9.1.
- NDRI preprocessing.

## 4. Results

#### 4.1 Results for « time » and « clicks »

The use of the Easytrace module makes it possible to decrease the time required in half to acquire the mountain roads and pedestrian ways in vectorial form. Moreover, the addition of a NDRI pretreatment does the same. The addition of these two techniques thus makes it possible to increase the productivity by a factor of four.

With regard to the number of clicks necessary, the Easytrace module is again a great help, since it allows their reduction to a factor four form. NDRI pre-processing does not have almost any influence on this point.

The complementary use of these two methods is thus very beneficial with regard to the resolution of the problems which bother us in terms of productivity.





Fig. 1: Compared results for "time" and "clicks

#### 4.2 Orthophotos planimetric accuracy

Obtaining the required information from air images, it is obvious that the planimetric accuracy of these vectorizations is directly dependent on the above images.

In order to optimize the computing time of the differential rectification, an altimetric value is not calculated for each pixel of the image. Only the altitudes of the points of anchoring given by the DTM (nodes of the triangular grid or points of the squaring of the DTM raster) are given. The altimetric values of the various remaining pixels are then interpolated between these points of anchorage. On the basis of this principle, one easily understands that the quality of the digital model of the ground used strongly influences the planimetric accuracy of the orthophotos. Moreover, one must also take into account the localiton of the CCD cells which collected the image, since that changes the angle of interception of the light with the ground, and thus also influences the accuracy.

Fig. 2: Orthophotos planimetric accuracy's principle

One thus distinguishes three factors influencing the planimetric accuracy from the orthophotos:

- Altimetric accuracy of the MNT used to carry out the orthorectification which admits a standard deviation dz.
- The line used for the acquisition of information: the angle of interception  $\alpha$  in the 0xz plan induces a planimetric difference dx = dz tan( $\alpha$ ).
- CCD cells used on the line: the angle of interception  $\beta$  in the 0yz plan induces a planimetric difference dy = dz tan( $\beta$ ).

Finally, the planimetric standard deviation of the chock of the orthophoto is then simply given to us by:

 $\sigma$  planimetric orthophoto =  $((dx)^2 + (dy)^2)^{1/2}$  [m]



## 4.3 Vectorization planimetric accuracy

Fig. 3: Root mean square of different vectorization methods

Concerning the variations observed, one notes several things:

- The noted variations are of about the same size as the accuracy of orthophotos georeferencing. This explains why the use of images NIRF is slightly less beneficial than the RGB or GRNN acquired by lines having a smaller angle of incidence.
- The use of the Easytrace module to improve planimetric quality of the vectorizations carried out. This is due to the fact places a great number of points of connections between the points clicked by the operator. The result is thus much smoother and the accuracy is consequently improved.
- The assistance of Easytrace is invaluable and effective since it makes it possible to avoid decreasing the accuracy of the vectorizations carried out on the images in tones of grey (mainly GRNN and NIRF). Indeed, the latter is less pleasant to use for the operator whose vision is used to the use of color to distinguish the various objects from the landscape.
- By emphasing the objects in 3D form, NDRI pre-processing makes it possible still to improve the planimetric quality of vectorization carried out. Indeed, its use makes it possible to erase any doubts with regard to the trajectory of certain paths or hiking trails placed in the shade or partially visible.
- The accuracy of the product of Swisstopo "VECTOR25" was also compared with the various methods suggested. It completely conforms with what is mentioned in documentation (~3-8m). These variations, relatively important, are mainly due to the generalization of the national chart from which this format from vectorial data results.

# 5. Conclusion

The images available within the framework of this project were taken in July 2005, which is certainly not the best period for the analysis of the problems discussed in this report. Indeed, as soon as the road is in the direct neighbourhood of trees, one can be sure that their foliage will complicate the extraction of this feature. The densely covered forest areas completely

hide the layout of the paths and hiking trails. To avoid this problem, an earlier date of the flight (e.g. April) would be better, so as to avoid not only the foliage but also the snow.

The image processing and the automatic extraction are sectors in full expansion. One cannot count the number of conferences and publications which deal with this subject all around the planet. These applications are intended for the creation of charts for the teams of developers who day by day refine the possibilities of recognition by the computer. The Easytrace module fits exactly here, since it helps the operator to extract the information in which we are interested. The benefits in productivity and accuracy allow the users of these technologies to launch newer products of better quality at a more competitive price.

The combination of these new software possibilities plus the performances with airborne sensor ADS40 have a promising future, for the detection of mountain roads and paths or other linear object in the territory. Their future uses in the fields of geomatic thus, are not only ensured, but moreover, extremely desirable, since they fall under the evolution of the profession dictated by the appearance of digital technology. Moreover, the precise details obtained make it possible to consider professional applications which were not possible hitherto (e.g. cadastre).



Fig. 4: In red, vector information on orthophoto (left RGB, right NDRI pre-processed)

- Parker J.R., 1997, Algorithms for image processing and computer vision, Wiley Computer Publishing
- [2] Pitas I., 2000, Digital image processing (Algorithms and applications), Wiley Computer Publishing
- [3] Leica Geosystems, 2006, Easytrace\_TechWhitePaper.pdf, http://gi.leica-geosystems.com/documents/pdf/

# Change detection based on the object features

#### IRMGARD NIEMEYER, CLEMES LISTNER & PRASHANTH REDDY MARPU<sup>1</sup>

Summary: For the detection of changes, several statistical techniques exist. When they adopted to high-resolution imagery, the results of the traditional pixel-based algorithms are often limited. Especially if small structural changes are to be detected, object-based procedures show promises. In the given paper, we propose an unsupervised object-based change detection and change classification approach based on the object features. Following the automatic pre-processing, image objects and their object features are extracted. Change detection is performed by the multivariate alteration detection (MAD), accompanied by the maximum autocorrelation factor (MAF) transformation. The change objects are then classified using the fuzzy maximum likelihood estimation (FMLE). Finally the classification of changes is improved by probabilistic label relaxation.

## 1 Introduction

For detecting changes at the pixel level, the user may choose one of the various statistical techniques, calculating e.g. the spectral or texture pixel values, estimating the change of transformed pixel values or identifying the change of class memberships of the pixels (Figure 1). But when adopted to (spatial) high-resolution imagery, the results of the pixel-based algorithms are often limited. Especially if small structural changes are to be detected, object-based procedures seem to be advantageous. In addition to the change pixel measures listed before, object-based change detection and analysis techniques can in also estimate the changes of other mean object features, such as shape and size, assess the modified relations among neighbouring, sub- and super-objects and find out changes regarding the object-based techniques have already demonstrated the advantages of firstly pinpointing the significant change pixels by statistical change detection and subsequently post-classifying the changes by means of a semantic model of change-related object features (NIEMEYER & NUSSBAUM 2006). In the given paper, we propose an unsupervised object-based change detection and change classification approach based on the object features.

# 2 Methodology

The proposed change analysis procedure consists of different steps pre-processing, including geometric and atmospheric correction (and possibly image fusion/pan-sharpening), object extraction and feature extraction, statistical change/no-change detection and finally change

Email: irmgard.niemeyer@tu-freiberg.de, Internet: http://www.geomonitoring.tu-freiberg.de This paper is an outcome from the GlobalMonitoring for Security and Stability (GMOSS) Network of Excellence in the Aeronautics and Space Priority of the EU Sixth Framework Programme.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Arbeitsgruppe Photogrammetrie/Geomonitoring, Institut für Markscheidewesen und Geodäsie, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg

analysis by clustering the changes. Figure 3 represents the workflow of the procedure that will be explained in the following.







Figure 2: Object-based change detection



Figure 3: Workflow of the change analysis procedure

#### 2.1 Pre-processing of the data

In the given paper the main emphasis was put on the detection and analysis of change objects. However, the pre-processing of the data should be listed briefly. For high-resolution satellite imagery the following pre-processing steps were applied: pan-sharpening by wavelet transformation (RANCHIN & WALD 2000), image-to-image registration by image correlation (LEHNER 1986), radiometric normalization using no-change pixels (CANTY et al. 2004). The procedure continues with the extraction of objects primitives by segmentation.

#### 2.2 Object extraction and feature extraction

For image data of two acquisition times, the segmentation into object primitives could be carried out a) on the basis of the bitemporal data set, b) by applying the segmentation parameters to the image data of one date and assigning the object borders to the image data of the other date, or c) separately for the two times.

When using a common segmentation (a, b), the generated objects show object features, which are either apparently time-invariant, such as shape, or differ at the two dates, i.e. most of the layer values. Thus, the time-variant object features present the basis to detect changes of and within the objects between the two dates. Provided a separate segmentation (c) for the two scenes, also the shape features will vary in time. The segmentation should therefore be able to similarly extract objects that haven't changed their object shape between the two acquisition times.

Given Definiens Professional (BAATZ & SCHAEPE, 2000), the so-called multiresolution segmentation uses homogeneity criteria based on spectral and/or spatial information and a scale parameter in combination with local and global optimization techniques. Thus, adopting the same segmentation parameters for both scenes does hardly yield similar objects in image regions with no or negligible changes (no-change objects), if significant changes have been taken place in other parts of the image. In fact, only for two absolute identical images (i.e. the one scene being a copy of the other one), the performed segments would be the same.

However, the variation of the objects shape features is in any case an important indicator for real object changes and needs to be taken into account for object-based change detection. For the unsupervised approach presented here, class-related object features were not considered, and also scene-related features were ignored so far. The techniques for change detection and analysis will be outlined now.

#### 2.3 Change Detection and Analysis

For change detection, the so-called Multivariate Alteration Detection (MAD) transformation (NIELSEN 2007) was used. This method was originally developed for change detection within the multispectral feature space of the image pixels and will be applied here within the multidimensional, multivariate feature space of the objects. The MAD procedure is based on a classical statistical transformation referred to as canonical correlation analysis to enhance the change information in the difference images and briefly described as follows: If multispectral images of a scene acquired at times  $t_1$  and  $t_2$  are represented by random vectors X and Y, which are assumed to be multivariate normally distributed, the difference D between the images is calculated by

$$D = \boldsymbol{a}^T \boldsymbol{X} \cdot \boldsymbol{b}^T \boldsymbol{Y}$$
 eqn. 1

Analogously to the principal component transformation, the vectors  $\boldsymbol{a}$  and  $\boldsymbol{b}$  are sought subject to the condition that the variance of D is maximized and subject to the constraints that  $var(\boldsymbol{a}^T\boldsymbol{X}) = var(\boldsymbol{b}^T\boldsymbol{Y}) = 1$ .
As a consequence, the difference image *D* contains the maximum spread in its pixel intensities and - provided that this spread is due to real changes between  $t_1$  and  $t_2$ - therefore maximum change information. Determining the vectors **a** and **b** that way is a standard statistical procedure which amounts the so-called generalized eigenvalue problem. For a given number of bands *N*, the procedure returns *N* eigenvalues, *N* pairs of eigenvectors and *N* orthogonal (uncorrelated) difference images, referred to as to the MAD variates. If the eigenvectors are ordered according to their decreasing eigenvalues, the MAD variates will be sorted according to increasing variance.

Since relevant changes of man-made structures will generally be uncorrelated with seasonal vegetation changes or statistic image noise, they expectedly concentrate in the higher order components (if sorted according to the increasing variance). Furthermore, the calculations involved are invariant under affine transformation of the original image data. For this reason, the MAD transformation can be qualified as a robust change detection technique.

The sum of squares of standardized variates

$$\chi^{2} = \left(\frac{D_{1}}{\sigma_{D_{1}}}\right)^{2} + \dots + \left(\frac{D_{N}}{\sigma_{D_{N}}}\right)^{2}$$
 equ. 2

is approximately chi-square distributed with N degrees of freedom. Supposing that no-change pixels have a chi-square distribution with N degrees of freedom, N being the number of MAD components, the change-probability can be derived for each pixel or object.

In order to improve the spatial coherence of the difference change components, a maximum autocorrelation factor (MAF) transformation was applied to the MAD variates (NIELSEN et al. 1998). Assuming that image noise is estimated as the difference between intensities of neighbouring pixels, the MAF transformation is equivalent to a minimum noise fraction (MNF) transformation, which generates image components with maximum signal to noise ratio (CANTY & NIELSEN 2006).

The decision thresholds for the change pixels could be set by standard deviations of the mean for each MAD or MAF/MAD component. Regarding automation a probability mixture model proposed by (BRUZZONE & PRIETO, 2000) was applied to the MAD or MAF/MAD variates. The techniques is based on an Expectation-Maximization algorithm to determine automatically the density functions for the change and no-change pixels and thus the optimal decision thresholds for discriminating change and no-change pixels.

Processing the MAD transformation on a number of object features enhances different types of changes within the object level rather than resulting in a real classification of changes. Only changes signalled by at most three MAD or MAF/MAD variates can be displayed at one time. The comprehensive visualization and labelling of change objects becomes difficult. For this reason, a clustering procedure was applied to the object's changes next.

#### 2.4 Unsupervised classification of changes

As suggested in (CANTY & NIELSEN 2006) and described in (CANTY 2006) in detail, the change objects were subsequently grouped by an unsupervised classification. By this means, any number

of MAD or MAF/MAD variates can be analysed simultaneously, and the number of change categories can be fixed by the number of clusters.

CANTY & NIELSEN (2006) recommend the use of the fuzzy maximum likelihood estimation (FMLE) introduced by (GATH & GEVA 1989). Unlike conventional clustering algorithms, FMLE takes advantages of forming elongated clusters and clusters of widely varying memberships, which applies for the change objects in the MAD or MAF/MAD feature space. The fuzzy cluster membership of an object calculated in FMLE is the a-posteriori probability p(C/f) of a object (change) class *C*, given the object feature *f*. According to (RICHARDS & JIA 1999), misclassifications of an image object can be corrected by taking the spatial information into account. The membership probabilities of an object can be evaluated in its spatial context with post-classification processing.

#### 2.5 Post-classification processing

CANTY & NIELSEN (2006) adapted a method presented in (RICHARDS & JIA 1999) referred to as probabilistic label relaxation. Using a neighbourhood function  $Q_m(k)$  for the pixels *m*, the technique examines the membership probabilities of objects in the neighbourhood of the particular object and corrects its membership probability

$$u_{km}^{i} = u_{km} \frac{Q_{m}(k)}{u_{jm} \sum_{i=1}^{K} Q_{m}(k)}, \quad k = 1...K$$
 eqn. 3

The modified membership probabilities can then be used for generating an improved classification. Moreover, correlation between the MAD variates and the original object features can help in the physically/spectrally founded labelling of the change clusters.

# 3 Case study

The proposed procedure will be illustrated for a bitemporal, high-resolution satellite imagery considering as an example monitoring a nuclear site in the Iran. Some of the facilities of the site were still under construction, in operation or shut down.

Both Definiens Professional 5.0 for segmentation and feature extracting and ENVI4.3/6.3 including the ENVI extensions for pre-processing, change detection and classification, provided by Morton J. Canty, Research Centre Juelich (http://www.fz-juelich.de/ste/remote sensing, see also (Canty 2006) for more information) were used.

The two QUICKIRD scenes, acquired in July 2002 and in July 2003, show a number of changes with different spatial and spectral dimensions (figures 4 and 5). As noted in section 2.1, the four multispectral bands were first of all pan-sharpened, the image scene of 2003 was then registered to the 2002 scene and radiometrically normalized using no-change pixels. Object extraction was done in Definiens Professional applying the same segmentation parameters to both scenes. The image objects resulting from the third segmentation level (Figures 6 and 7) were chosen for the succeeding change detection and classification steps. Due to the fact that Definiens Professional neither supplies tools for the statistical change detection nor enables to implement additional procedures by the user, all object features subject to change detection needed to be exported.



Figure 4: QUICKIRD image data acquired at July 24, 2002 over the site



Figure 6: 1229 objects in segmentation level 3 for the image data of 2002



Figure 5: QUICKIRD image data acquired at July 9, 2003 over the site, radiometrically normalized



Figure 7: 1368 objects in segmentation level 3 for the image data of 2003

Two categories of object features were considered: Firstly the layer features, in particular brightness and the mean values of the four multispectral bands, and secondly specific shape features, i.e. border index, roundness, compactness, shape index and length/width. In principle, also other layer and shape features or texture features could have been included, too. For detecting the object's changes a MAD transformation was carried out based on the layer features and based on the shape features, followed by an MAF transformation on the processed MAD variates. The produced MAF/MAD variates were ordered according to the increasing signal-to-noise-ratio. Figures 8 and 9 show the MAF/MAD variates 3 (red), 4 (green) and 5 (blue) for the layer and the shape features with automatically determined thresholds, the colour grey displays the range between the lower and the upper threshold, i.e. no-change. Different categories of changes are represented by different colours. Expectedly, the shape features differ significantly due to the different segmentations results, as described in section 2.2. Then, the FMLE procedure was applied to the MAD variates, a number of five clusters were chosen. According to section 2.5, the probabilistic label relaxation was used to optimize the membership probabilities of the objects.

The final classification is given in Figure 10 and 11. In Figure 10, the blue class highlights changes of the building's roof colour due to different illumination conditions, whereas the green class presents (among other changes) the completion of two buildings between 2002 and 2003 in the upper part of the site.



Figure 8: Changes of layer features, given in the MAF/MAD components 3 (red), 4 (green) and 5 (blue), grey indicates no-change



Figure 10: Final FMLE Clustering of the MAD change information on the layer features



Figure 9: Changes of shape features, given in the MAF/MAD components 3 (red), 4 (green) and 5 (blue), grey indicates no-change



Figure 11: Final FMLE Clustering of the MAD change information on the shape features

The red class involves all changes related to high colour variations, i.e. completion of the street, different shadow formation and others. The colours yellow and white indicate no-change classes. In Figure 11, the red, blue and yellow classes illustrate significant changes of the object's shape, green and white probably show no changes. Whether these changes are related to real changes or caused by the process of the segmentation itself, needs to be examined. The visual comparison of Figure 6 and Figure 7 yields some indications: The changes indicated by the third MAF/MAD component in red, are mainly connected to segmentation variation of the sandy, non-vegetation surface.

# 4 Conclusions and future work

The given paper introduces an unsupervised approach to statistically analyse changes on the basis of various object features. The preliminary results have not proved very satisfactory so far, but show promises nevertheless. The future work has to meet the following challenges:

 Assessing changes on the basis of shape features presumes a segmentation algorithm that is able to similarly extract no change objects, i.e. objects with unvarying shapes. The multiresolution segmentation provided with the Definiens software does not fulfil this condition, as it considers spectral information at least for the first segmentation level and applies global optimization techniques. Even if the initial random seed is being fixed for the two (or more) co-registered image data sets, the object borders will differ also for objects with constant shape.

- The accuracy of the change analysis may be improved by applying the procedure only to the change pixels. As suggested in (CANTY & NIELSEN 2006) the chi-square distribution calculated during the MAD transformation could be used to estimate the change-probability for each pixel.
- 3. Analysing (small-scale) three-dimensional objects, such as buildings, using high resolution imagery requires an accurate orthorectification of the data. Otherwise, different parallax due to varying off-nadir views will cause false alarms in the change detection process.
- 4. Finally, the inclusion of other object features and the integrated analysis needs to be investigated and evaluated.

# 5 References

- BAATZ, M. & SCHAEPE, A., 2000. Multiresolution segmentationan optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: STROBL, J., BLASCHKE, T. & GRIESEBNER, G. (eds), Angewandte Geographische Informations-Verarbeitung XII, Wichmann, Karlsruhe, pp. 12–23.
- BRUZZONE, L. & PRIETO, D. F., 2000. Automatic analysis of the difference image for unsupervised change detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 11(4), pp. 1171–1182.
- CANTY, M. & NIELSEN, A. A., 2006. Visualization and unsupervised classification of changes in multispectral satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing* 27(18), 3961-3975.
- CANTY, M. J., 2006. Image Analysis, Classification and Change Detection in Remote Sensing, with Algorithms for ENVI/IDL. Taylor & Francis, CRC Press, Boca Raton.
- CANTY, M. J., NIELSEN, A. A. & SCHMIDT, M., 2004. Automatic radiometric normalization of multispectral imagery. *Remote Sensing of Environment* 91, pp. 441–451.
- GATH, I. & GEVA, A. B., 1989. Unsupervised optimal fuzzy clustering. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **3**(3), pp. 773781.
- LEHNER, M., 1986. Triple stereoscopic imagery simulation and digital image correlation for MEOSS project. Proc. ISPRS Commision I Symposium, Stuttgart pp. 477–484.
- Nielsen, A.A., 2007, The Regularized Iteratively Reweighted MAD Method for Change Detection in Multi- and Hyperspectral Data. *IEEE Transactions on Image Processing* 16(2), 463-478.
- NIEMEYER, I. & NUSSBAUM, S., 2006. Change detection the potential for nuclear safeguards. In: AVENHAUS, R., KYRIAKOPOULOS, N. RICHARD, M. & STEIN, G. (eds), Verifying Treaty Compliance. Limiting Weapons of Mass Destruction and Monitoring Kyoto Protocol Provisions, Springer, Berlin, pp. 335–348.
- RANCHIN, T. & WALD, L., 2000. Fusion of high spatial and spectral resolution images: The ARSIS concept and its implementation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 66, pp. 49–61.
- RICHARDS, J. A. & JIA, X., 1999. Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction. 3 edn, Springer, Berlin.

# Application of Support Vector Machine for Complex Land Cover Classification using Aster and Landsat Data

# CLAUDIA HAHN<sup>1</sup>, ARIEF WIJAYA & RICHARD GLOAGUEN

Abstract: Different land cover classification methods exist. This paper shows that Support vector machines (SVMs) have the potential to outperform Maximum Likelihood and Minimum Distance Classification in rugged area covered with rainforest and in undulating areas dominated by fields, grassland and coniferous forest. However, SVM does not guarantee better classification results. Kernel and generalization parameters as well as the input variables significantly influence the performance of SVM.

# 1 Introduction

Correct and up-to-date information on land cover is required for many applications, including environmental change detection, land resource planning as well as environmental risk assessment. The analysis of satellite images enables land cover mapping at a big scale. Thus, remote sensing is widely used in order to perform land cover classification. This study aims to explore the performance of Support Vector Machine (SVM) method for complex land cover classification. Applying SVM to Aster and Landsat satellite datasets on Erzgebirge Region in Eastern Germany and on Andes Area, Southern Ecuador we hope to receive better results than the conventional Maximum Likelihood Classification (MLC) and Minimum Distance Classification (MDC).

# 2 Theoretical background of SVM

SVM is a type of universal learning machine [9]. In other words it is a learning algorithm used for pattern recognition and was originally designed to solve binary classification problems based on training data. There are several publications that describe in detail the mathematical background of SVM ([1], [2], [7], [8] and [9]). Based on these publications the basic idea of SVM will be presented in the following paragraph.

#### 2.1 Linear Support Vector Machines for the separable case

SVM solves the classification problem by constructing an optimal hyperplane that separates the data. Several hyperplanes are able to divide a set to f data into two classes (Figure 1). The one with the largest margin denotes the optimal hyperplane. The margin, measured perpendicular to the hyperplane, is defined as the sum of the distances from the closest points of each class to the hyperplane (Figure 2).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Claudia Hahn: Institute for Geology, TU-Bergakademie, B. von Cottastr. 2, 09599 Freiberg, Germany, Tel.: 03731/ 393058, e-mail: claudiahahn@yahoo.de



Figure 1 Hyperplanes that separate the data

How to find the optimal hyperplane? Imagine a set of training data

$$\{x_i, y_i\} \in X, \ i = 1, ..., m, \ y_i = \{-1, 1\}$$
 eq. 1

with X being the input space, e.g.  $R^N$ , x is the input data and y defines the class label. y can be either 1 or -1. The class of hyperplanes considered and the corresponding decision functions look as follows.

Class of hyperplanes:	$(w * x) + b = 0 \in \mathbb{R}^N, b \in \mathbb{R}$	eq. 2
Decision functions:	$f(x) = \operatorname{sgn}((w * x) + b)$	eq. 3

The points x which lie on the hyperplane satisfy (w \* x) + b = 0. w is a vector perpendicular to the hyperplane and called a weight vector. b is called a threshold or bias and |b|/||w|| is the perpendicular distance from the hyperplane to the origin [1], with ||w|| being the euclidean norm of w (see Figure 2). b=0 would force the hyperplane to pass through the origin.



Figure 2 Optimal linear separating hyperplane for the separable case [1]

The points closest to the optimal hyperplane are situated on the parallel hyperplanes  $H_1$  and  $H_2$  and are named support vectors. They satisfy |(w \* x) + b| = 1. In Figure 2 they are circled. The margin is linearly dependent on 1/||w|| ([2]). To find the optimal hyperplane training points that are closest to the hyperplane must be identified and w and b must be chosen so that the margin is maximized. This optimisation problem can be solved through its Lagrangian dual. The hyperplane decision function can then be written as

$$f(x) = \operatorname{sgn}\left(\sum_{i=1}^{m} y_i \alpha_i * (x * x_i) + b\right)$$
 eq. 4

It needs to be pointed out that only a subset of the training patterns, the support vectors, are relevant to construct the optimal hyperplane. The classification of a new data point x is based on a weighted comparison between this point and the support vectors.

#### 2.2 Non-linear SVM for the separable case

Most of the time it is not possible to separate the data in the input space X using a linear function. The idea behind SVM is to map the input data into a higher dimensional space (feature space H), where a hyperplane that separates the two classes can be constructed.



Figure 3 Input space X and feature space H [10]

The example in figure 3 shows that the hyperplane in the feature space corresponds to a nonlinear surface in the input space. In order to reduce extensive calculations a kernel k is used as a similarity measure. Different types of SVM exist. They depend on the choice of the kernel function k. x and x' beeing two input vectors:

$$k(x, x') = (\mathbf{x} * \mathbf{x}') = \phi(x) * \phi(x')$$
eq.6

#### 2.3 Non-separable case

In practice, a separating hyperplane often does not exist due to a large overlap of the classes. The aim is to find a hyperplane that maximizes the margin and keeps the misclassification of training examples small. "The trade-off between the marg in and the misclassification error is controlled by a user-defined constant" [6]. Two possible realizations are the "Soft Margin Support Vector Classifiers" C-SVC and the -SVC. Applying the C-SVC the user needs to define a parameter C, with C > 0, which controls the trade-off. A high C forces the creation of an accurat e model, with very few misclassifications that may not generalize well ([3]). Choosing a lower C allows more misclassifications. C is called a regularization parameter. Using the - soft margin support vector classifier the parameter C is replaced by the parameter, ranging from 0 to 1. [2] give an introduction on -SVC.

#### 2.4 Multiple classes

Two main approaches have been developed for multi-class classification using SVM: The oneagainst-all (OAA) and one-against-one (OAO) method. OAA compares one class with all the others taken together. Having n classes, n hype rplanes are determined, n optimization problems need to be solved and n classifiers are generated, The OAO approach performs a binary SVM on all possible pairs out of n classes. Each classifier is trained on two out of n classes. The number of classifiers therefore is n(n-1)/2. Applying these classifiers to a test data point leads to n(n-1)/2class votes. The test data gets the class labe 1 from the class that received the most votes. OAA and OAO reduce the multi-class dataset to several bi nary problems that have to be solved. T he same applies to the directed acyclic graph SV M (DAGSVM) [5]. Some new approaches were invented to solve the multi-class problem without reducing it to several binary cases, e.g. [3], [5], [11].

#### 3 **Classification experiments**

Two different data sets were considered. (I) ASTER data covering a part of the Erzgebirge region in Eastern Germany and (II) LANDSAT data comprising a region within the Andes, Southern Ecuador. SVM classifications were performed using the SPIDER toolbox (I), available at (http://www.kyb.tuebingen.mpg.de/bs/people/spider/), and LIBSVM (II). Based on the suggestions of [4] for all classifications the following settings were chosen:

- RBF Kernel:
  - (I)  $K(x_i, x_j) = \exp(-\|x_i x_j\|^2 / 2\sigma^2)$  (II)  $K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \|x_i x_j\|^2)$
- OAO multi-class approach
- C-SVC

Thus, the kernel parameters  $\sigma$  and  $\gamma$  respectively, and the regularization parameter C needed to be defined. Cross-validation (cv) was used to select the best parameter combination. Applying nfold-cross-validation means that the training data set is divided into n subsets. Each subset is tested once using the classifier trained on the remaining (n-1) subsets. The parameter combination leading to the smallest cv-error was used for classification. The classifications performed on data set (I) were based on the 3 VIR and 6 SWIR bands whereas for data set (II) different input variables were tested in order to search for the best band combination. To evaluate the performance of SVM a Maximum Likelihood Classification (MLC) and a Minimum Distance Classification (MDC) using the same training sites and bands as for the SVM approach were applied as well.

# 4 Results and Discussion

#### 4.1 Aster Data of the Erzgebirge region

The study area is situated in the eastern part of the Erzgebirge, covering the Weisbach catchment area, and is dominated by fields, grassland and coniferous forest. The altitude above see level ranges from 450 m to 800 m.

According to the parameters selected for this data set, it seems that training sets with highly overlapping classes and training sets consisting of classes with a wide spectral range require higher parameter values than training sets with clearly separated classes covering a smaller spectral range.

The performed classifications show that SVM can obtain better classification results than MLC. Good parameter combinations can lead to accuracies of 91 % whereas the accuracy achieved with MLC is 87%. In addition, no filter needs to be applied after classification when good parameters were chosen. On the other hand, bad parameter combinations can lead to classification results worse than MLC. Consequently, the performance of SVM particularly depends on the kernel parameter sigma and the generalisation parameter C. Even small parameter variations have a considerable impact on the classification. Thus, a good parameter selection method is crucial.

#### 4.2 Landsat ETM Data of Southern Ecuador

The study area of Southern Ecuador placed within the borders of Zamora-Chinchipe province is topographically dominated by mountainous terrain and natural tropical rainforests. Primary and secondary forests along with bushes, shrubbery and pasture are dominant land cover types of the area. This site, which has a size of 225 km<sup>2</sup>, is situated in the Sierra between the provincial capitals Loja and Zamora. The altitude above sea levels ranges from 660 m in the valley of Rio Zamora (Southeastern part of the study area) to 3400 m in the Southwestern part of the study area.

The Landsat bands 12457 led to the best SVM classification outcome. Using this band combination the classification accuracy for SVM classification was 69%, which is better than the MLC and MDC accuracies of 64.5% and 54%, respectively. The classification results show different major land cover types. This is probably due to the distribution of ground data, which were collected along the river and the road. Dominant mountainous terrain causes the collection of ground data to be less distributed over the whole area.

# 5 Conclusion

SVM has the potential to outperform conventional classification methods like the Maximum Likelihood Classification (MLC) and Minimum Distance Classification (MDC) in rugged terrain of tropical rainforest as well as in undulating regions dominated by fields and coniferous forest. The best SVM classifications led to accuracies of 91 % for the Erzgebirge region and 69% for the Andes area in Southern Ecuador. The classification accuracies for Ecuador are way lower than for the Erzgebirge region, due to the more diverse landscape and the limited availability of evenly distributed training sites. This study shows that SVM based on a Radial Basis Function (RBF) kernel, the C-Soft-Margin-Support-Vector and One-versus-One approach can deliver very good but also quite bad classification results. The outcome very much depends on the kernel and generalization parameters as well as on the input variables, that means in this case the satellite band combination. Furthermore, there are other factors, not investigated here, that influence the performance of SVM: (I) the kernel, (II) the multi-class approach and (III) the model selection method. Thus, a lot more investigations are needed in order to find the best SVM method for a given data set.

# 6 Literaturverzeichnis

- BURGES, CHRISTOPHER J. C., 1998: A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition. Data Mining and Knowledge Discovery, 2(2):121–167.
- [2] CHEN, P. H., LIN, C. J. & SCHÖLKOPF, B., 2005: A Tutorial on nu-Support Vector Machines. Applied Stochastic Models in Business and Industry, 21: 111-136.
- [3] FOODY, G. M. & MATHUR, A., 2004: A Relative Evaluation of Multiclass Image Classification by Support Vector Machines. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 42 (6): 1335-1343.
- [4] HSU, C.W., CHANG, C.C. & LIN, C.J.: A Practical Guide to Support Vector Classification. [Online] Available: http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm/ (Accessed: 08.01 2007).
- [5] HSU, C. W. & LIN, C. J., 2002: A comparison of methods for multiclass support vector machines. IEEE Transactions on Neural Networks, 13(2): 415–425.
- [6] PAL, M. & MATHER, P. M., 2005: Support vector machines for classification in remote sensing. International Journal of Remote Sensing, 26(5): 1007–1011.
- [7] SCHÖLKOPF, B., 2004: Statistische Lerntheorie und Empirische Inferenz. Max-Planck-Institut f
  ür biologische Kybernetik, T
  übingen, Jahrbuch 2004.
- [8] SCHÖLKOPF, B. & SMOLA, A., 2002: Learning with Kernels: Support Vector Machines, Regularization, Optimization, and Beyond. MIT Press.
- [9] VAPNIK, V. N., 2000: The Nature of Statistical Learning Theory (Statistics for Engineering and Information Science). Springer Verlag, Second edition.
- [10] WESTON, J.: Support Vector Machine (and Statistical Learning Theory) Tutorial. [Online] Available: http://www1.cs.columbia.edu/~kathy/cs4701/documents/jason\_svm\_tutorial.pdf (Accessed: 16.02.2007)
- [11] WESTON, J. & WATKINS, C., 1998: Multi-class Support Vector Machines. Technical Report CSD-TR-98-04, Department of Computer Science, Royal Holloway University of London, egham, TW20 0EX, UK.

# Biotoptypenmonitoring - Identifikation von Veränderungen mittels höchst auflösender digitaler Fernerkundungsdaten

# MONIKA GÄHLER<sup>1</sup> & JOCHEN SCHIEWE<sup>2</sup>

Zusammenfassung: Wichtiger Bestandteil für ein Biotoptypenmonitoring ist neben der kontinuierlichen, hochgenauen und flächendeckenden Erfassung der Biotoptypen die Analyse der Veränderungen zwischen unterschiedlichen Zeitpunkten. Im Artikel wird durch einen Vergleich von erzielten Klassifikationsergebnissen auf Basis zweier höchst auflösenden Fernerkundungsaufnahmen (2000 und 2002) untersucht, inwieweit diese Datengrundlage in Kombination mit entwickelten Auswertemethoden ein Biotoptypenmonitoring präzisieren und beschleunigen können. Als Ergebnis kann konstatiert werden, dass sich die erzielten Klassifikationsergebnisse für ein präzises Biotoptypenmonitorin eignen und kleinste Veränderungen der Bestände identifiziert sowie quantifiziert werden können. Allerdings muss neben einer Quantifizierung der Veränderung eine inhaltliche Bewertung der Abweichungen erfolgen.

# 1 Motivation

Wesentliche Voraussetzung für ein systematisches, fundiertes Handeln in der Natur- und Landschaftsplanung ist die genaue Kenntnis der vorhandenen Ausstattung der Landschaft sowie deren räumlichen Verteilung. Neben der hochgenauen, flächendeckenden Erfassung der Landschaft ist vor allem die Dokumentation der Veränderungen entscheidungsrelevant für die Bewertung der Landschaftsausstattung bzw. -entwicklung (vgl. z.B. BALZER 2000).

In der Bundesrepublik Deutschland hat sich die Biotoptypenkartierung (Abkürzung: BTK) seit einigen Jahren zur maßgeblichen Erfassungs- und Bewertungsgrundlage für die Natur- und Landschaftsplanung entwickelt. Fortlaufende Aktualisierungen der BTK, die vor allem durch anthropogene Eingriffe als auch durch natürliche Entwicklungsprozesse notwendig sind, können mit Hilfe konventioneller Methoden der Biotoptypenerfassung jedoch nur unzureichend realisiert werden. Einer Durchführung in kurzen Zeitintervallen steht insbesondere der hohe Zeit- und Kostenaufwand der etablierten Verfahren entgegen. Mit den bisherigen Methoden der Datenaufnahme bzw. -verarbeitung ist zudem eine notwendige exakte Vergleichbarkeit der Datenbestände nicht gewährleistet. Subjektivität bei der Auswertung, Generalisierungen sowie eine hohe Fehlerrate bei der räumlichen Abgrenzung der Biotoptypen führen dazu, dass Veränderungen der Landschaftsausstattung nur eingeschränkt zu identifizieren sind.

In vorherigen Untersuchungen (siehe z.B. EHLERS ET AL. 2006) wurden zunächst verschiedene (pixel- und regionenbasierte) Methoden zur Biotoptypenerfassung aus höchst auflösenden Fernerkundungsdaten (< 1 m Bodenpixelgröße) erfolgreich entwickelt und angewendet. Für Untersuchungsgebiete an der Unterelbe konnten geometrisch sehr genaue Abgrenzungen erzielt werden.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Dr. Monika Gähler: DLR, Postfach 1116, 82234 Wessling. Email: Monika.Gaehler@dlr.de

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> apl. Prof. Dr.-Ing. Jochen Schiewe: Institut f
ür Geoinformatik und Fernerkundung ,Universit
ät Osnabr
ück, Kolpingstr. 7, 49074 Osnabr
ück. Email. jschiewe
@igf.uni-osnabr
ueck.de

In dem folgenden Artikel wird erläutert, inwieweit sich die erzielten Klassifikationsergebnisse bzw. die entwickelten Auswertemethoden für ein Biotoptypenmonitoring eignen. Aufgrund der sehr genauen räumlichen Abgrenzung der Biotoptypen ist zu erwarten, dass sich auch kleinere Veränderungen bei einem Vergleich zeitlich verschiedener Zustände präzise ermitteln lassen. Für diese Analyse wird das Untersuchungsgebiet Heuckenlock verwendet, für das höchst auflösende HRSC-A bzw. HRSC-AX-Daten aus dem Jahr 2000 und 2002 vorliegen.

# 2 Biotoptypenmonitoring –Veränderungsidentifikation

#### 2.1 Forschungsstand und Vorgehensweise

Es gibt verschiedene Ansätze für das Erkennen von Veränderungen und Entwicklungen mittels Fernerkundungsdaten (change detection). Die Verfahren sind abhängig von den zugrunde liegenden Daten, die sich nach STRUNZ & GÜLS (1999) in vier Gruppen unterteilen lassen:

- 1. Kalibrierte Daten bzw. Reflexionswerte (z.B. Differenzen zwischen Albedowerten)
- 2. Transformierte Daten (z.B. Differenzen zwischen Vegetationsindizes)
- 3. Interpretierte Daten (z.B. Analyse der Landnutzungsänderung)
- 4. Maßzahlen interpretierter Daten (z.B. Veränderung von Maßzahlen zur Flächenform)

Die Identifikation der Veränderung erfolgt bei den ersten beiden Gruppen auf der Basis der Differenzbildung von Spektralwerten oder daraus abgeleiteten Maßen. Hingegen basieren die Verfahren der beiden weiteren Gruppen auf interpretierten Werten, wobei die Interpretation für die betrachteten Zeitpunkte jeweils getrennt durchgeführt wurde. Die Veränderungsdetektion beruht entsprechend auf dem Vergleich der interpretierten Datensätze oder daraus abgeleiteter Parameter. MAS (1999) und LUNETTA (1999) geben einen Überblick über die Vor- und Nachteile verschiedener digitaler Verfahren für die Satellitenbildanalyse und vor allem MAS (1999) bewertet die Verschneidung unabhängiger Klassifizierungen als das change detection-Verfahren, mit der die höchste Genauigkeit erzielt werden kann. Nachteilig wirken sich die hohen Kosten und die Gefahr der Aufsummierung von Fehlern aus den Einzelklassifizierungen aus (LUNETTA 1999). Für höchst auflösende Fernerkundungsdaten liegen bislang noch keine multitemporalen Analysen vor.

Da der vorliegenden Untersuchung Daten unterschiedlicher radiometrischer und spektraler Auflösung (HRSC-A und HRSC-AX) zugrunde liegen, können die change detection-Verfahren nicht anhand der spektralen Informationen, sondern lediglich auf Grundlage interpretierter Datensätze durchgeführt werden. Auf die Veränderungsanalyse, basierend auf abgeleitete Maßzahlen interpretierter Daten, wird ebenfalls verzichtet, da u.a. nach MAS (1999) und LUNETTA (1999) eine Bilanzierung der interpretierten Daten eine genauere Definition der detektierten Veränderungen ermöglicht. Es wird daher im Folgenden untersucht, inwieweit sich die erzielten Klassifikationsergebnisse bzw. die entwickelten Auswertemethoden für ein Biotoptypenmonitoring eignen. Dabei werden neben einer globalen Bilanzierung der Veränderung bzw. Übereinstimmung (siehe Abschnitt 2.2.1) die Notwendigkeit der Aggregation von Objektklassen (Abschnitt 2.2.2) sowie die detaillierte Bilanzierung von Objektklassen (Abschnitt 2.2.3) thematisiert.

Eine weitere Möglichkeit der Ermittlung von Veränderungen besteht in der Verknüpfung aktueller (klassifizierter) Fernerkundungsdaten mit älteren digitalen Vektordaten. Bei einer Bilanz von Daten, die mit unterschiedlichen Methoden erfasst wurden, ergeben sich Differenzen (hier zwischen Kartierung 1992 und Klassifikation 2000 bzw. 2002) nicht zwangläufig aufgrund von Veränderungen der Bestände, sondern sind durch unterschiedliche Grade der Generalisierung und Erfassungsmaßstäbe verursacht und somit nur sehr eingeschränkt miteinander vergleichbar. Auf einen Vergleich mit einer Bilanzierung der konventionellen Kartierung und der Klassifikation(en) wird daher verzichtet bzw. auf GÄHLER & SCHIEWE (2006) verwiesen. Hier wurde im Rahmen der Genauigkeitsuntersuchung die Problematik der unterschiedlichen Erfassungsmethoden und der daraus resultierenden Unsicherheiten anhand eines Ausschnitts von Heuckenlock demonstriert und erläutert. Diese Ergebnisse fließen in die abschließende zusammenfassende Bewertung ein (Abschnitt 2.3).

# 2.2 Identifikation von Veränderungen im Zeitraum 2000-2002 – Vergleich auf Basis zweier Klassifikationen

#### 2.2.1 Globale Bilanzierung "Veränderung/Übereinstimmung"

Eine Gesamtbilanzierung erfolgt durch eine Verschneidung der Klassifizierungsergebnisse der Jahre 2000 und 2002. In der Abbildung 1 sind die Flächen, die eine unterschiedliche Ausprägung in den beiden Klassifikationen aufweisen, rot dargestellt und die Flächen mit übereinstimmendem Biotoptyp grün. Insgesamt sind in diesem Untersuchungsgebiet im Zeitraum von 2000 bis 2002 Änderungen von 25,7 ha (14,1% der Gesamtfläche) festzustellen und 156,3 ha weisen (85,9% der Gesamtfläche) keine Veränderungen auf.



Abbildung 1: Veränderungsanalyse aller Biotoptypen (2000-2002) Heuckenlock (GÄHLER 2006)

Bei genauer Analyse der Unterschiede wird deutlich, dass die meisten der so identifizierten Veränderungen (bis auf wenige Ausnahmen) auf reale Wandlungen gründen. Bei der grafischen Darstellung werden jedoch auch Einzelpixel sichtbar, die aufgrund der leicht unterschiedlichen Ausgangsdaten sowie der daraus resultierenden leicht modifizierten Auswertemethodik verschiedene Klassenzuweisungen beinhalten. Hierdurch wird die Notwendigkeit identischer Parameter bei der Datenaufnahme und -auswertung für einen exakten Vergleich offensichtlich. Gleichwohl kann konstatiert werden, dass viele der (realen) Änderungen nur auf Basis dieser geometrisch exakten Daten und der entwickelten Auswertestrategie erfasst und quantifiziert werden können. Allerdings wird auch deutlich, dass eine Analyse und Bewertung der Veränderungsparameter für einzelne Biotoptypenklassen erfolgen muss, wobei sowohl eine Betrachtung der räumlichen Lage als auch der summierten Flächen sinnvoll ist.

#### 2.2.2 Veränderungen aggregierter Objektklassen

Bereits anhand des Untersuchungsgebiets Heuckenlock wird deutlich, dass eine Veränderungsanalyse auf Basis von über 15 Klassen sehr schwierig und unübersichtlich ist. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass eine derartige Analyse für deutlich größere Untersuchungsgebiete vorgenommen werden muss, ist eine Beschränkung auf die Bewertung einzelner Biotoptypen oder eine Aggregation von Klassen unumgänglich. Durch den hierarchischen Aufbau eines Biotoptypenschlüssels (hier: VON DRACHENFELS 2004) bietet sich zunächst die Kombination der Biotoptypen auf Basis der Untereinheiten (ohne Zusatzmerkmale) und in einem nächsten Schritt in Haupteinheiten an.

Eine auf Obergruppen aggregierte Analyse ist allerdings nicht zu befürworten, da hierbei Landschaftselemente kombiniert werden, die u.a. einen unterschiedlichen Schutzstatus aufweisen (z.B. Fluss, Flusswatt-Röhricht und Flusswatt). Je nach Fragestellung erscheint jedoch eine Bildung von Sinngruppen auch unabhängig der Biotoptypenschlüssel zweckmäßig, wie z.B. in Röhrichte, in denen dann sowohl Land- als auch Flusswatt-Röhrichte (NR und FW) zusammengefasst werden. Im folgenden Beispiel bei der Bewertung der Röhrichte erfolgt eine Aggregation der Biotoptypen FWR und FWR v (Flusswatt-Röhricht [verbuscht]).

#### 2.2.3 Bilanzierung der Objektklassen (insbesondere Flusswatt-Röhricht)

Anhand der Tabelle 1 werden für einzelne Biotoptypen (Ausschnitt) die Veränderungen und Übereinstimmungen mittels Flächenparameter aufgeführt. Die Übereinstimmung (grau unterlegt) ist bei den meisten Biotoptypen groß, in einigen Fällen sind jedoch deutliche Abweichungen identifizierbar. So sind z.B. einige Objektklassen nicht in beiden Klassifikationen enthalten (z.B. FWR v und GIA). Diese Flächen werden entsprechend durch andere Biotoptypen repräsentiert. Des Weiteren sind aber auch deutliche Abweichungen innerhalb einer Biotoptypenklasse identifizierbar, wie z.B. bei FZT (Mäßig ausgebauter Flussunterlauf mit Tideeinfluss). Wo die klassifizierten Daten des Jahres 2000 den Biotoptyp FZT dokumentieren, werden 2002 allein 11.721 m<sup>2</sup> der Klasse KSN zugewiesen. Diese Veränderung ist durch unterschiedliche Wasserstände bei der Datenaufnahme verursacht und kann somit nicht in Bewertungen einfließen. Absolut identische Aufnahmebedingungen hinsichtlich der Wasserstände zu schaffen, ist jedoch insbesondere unter Berücksichtigung der Größe des gesamten Untersuchungsraumes unmöglich. Hierdurch wird deutlich, dass im Anschluss an bzw. in Kombination mit einer quantitativen Veränderungsanalyse eine inhaltliche Bewertung der erzielten Ergebnisse erfolgen muss.

2002	DOZ	FWR	FWR v	FZT	GIA d	GMF	HB	HFB	KSN	NRG	UHF	UHM	WWT	
2000														Gesamt
FWR	1.576	464.224	3.304	460	1.392	324	1.216	742	2.657	1.132	2.895	1.486	27.140	525.928
FZT	*	1.930	-	591.453	102	120	84	87	11.721	476	1.814	251	753	610.863
GIA	33	34	-	-	3.104	-	-	-	78	-	71	-	8	3.429
GIA d	1	247	-	-	44.996	-	-	-	-	-	204	3.387	827	51.286
GMF	-	1.784	-	-	33	10.294	-	217	37	-	94	-	1.848	14.806
HB	-	636	-	1	-	17	1.898	-	12	-	200	-	1.163	5.478
HFB	-	402	-	336	-	-	-	8.134	27	-	-	-	-	9.109
KSN	-	-	-	-	-	14	-	-	95	-	2	-	-	112
NRG	6	1.414	-	-	-	-	-	-	202	244	785	-	67	2.900
UHF	8	8.914	716	-	1.609	9	171	146	6	860	32.033	1.982	3.407	52.384
UHM	-	313	-	-	233	-	-	-	-	-	899	6.580	63	8.112
WWT	101	11.918	210	257	490	2.152	316	27	1.256	173	2.485	416	<mark>212.638</mark>	243.767
Gesamt	2.103	507.697	5.465	593.567	85.099	14.535	5.201	9.394	19.619	4.127	51.473	15.432	262.314	

Tabelle 1: Veränderungen (m<sup>2</sup>) der Biotoptypen (Ausschnitt) von 2000 - 2002 (GÄHLER 2006, modifiziert)

Am Beispiel des Biotoptyps Flusswatt-Röhricht (FWR) wird im Folgenden eine detaillierte Betrachtung der Veränderungen vorgenommen. Zur Vereinfachung bzw. zur besseren Visualisierung der Veränderungen, wird ein Ausschnitt von Heuckenlock (28,4 ha) gewählt, in dem viele Änderungen erfolgt sind. Des Weiteren wird der Biotoptyp FWR v (Flusswatt-Röhricht verbuscht), der nur im Zeitschnitt 2002 existiert, mit FWR kombiniert. Dieses Teilgebiet ist in der Abbildung 2 mit berechneter Zu- und Abnahme der kombinierten Objektklasse FWR/FWR v dargestellt. Für den gewählten Ausschnitt ist in der Flächenbilanz neben dem Verlust von 0,9 ha ein Gewinn von 0,4 ha zu verzeichnen (siehe Tabelle 2). Somit haben sich in diesem Teilgebiet nur für den Biotoptyp FWR/FWR v Änderungen von insgesamt 1,3 ha ergeben und 5,3 ha der Klasse FWR/FWR v sind keinem Wandel unterlegen.

Veränderung - Gewinn Fläche (in m <sup>2</sup> )		Veränderung - Verlust	Fläche (in m <sup>2</sup> )
BAT zu FWR(v) 508,4		FWR zu BAT	1187,3
FZT zu FWR(v)	511,7	FWR zu DOZ	192,7
GMF zu FWR(v)	338,2	FWR zu FZH	0,8
HB zu FWR(v)	39,5	FWR zu FZT	290,7
KPS zu FWR(v)	124,5	FWR zu HB	96,2
UHF zu FWR(v)	1113,2	FWR zu KPS	325,8
WWT zu FWR(v)	1696,1	FWR zu KSN	399,7
Zunahme gesamt 4331,6		FWR zu NRG	435,7
		FWR zu UHF	110,5
		FWR zu WWT	6125,9
		Abnahme gesamt	9165,3
Keine Verä	nderung FWR(v)		52839,9

Tabelle 2: Entwicklungen des Biotoptyps FWR( v) im Zeitraum von 2000 zu 2002 für den in Abbildung 2 dargestellten Ausschnitt (GÄHLER 2006)

Anhand der Tabelle 2 wird darüber hinaus die Art der Veränderung ersichtlich. Auffällig ist die Menge der Flächen, bei denen eine Umwidmung von oder in den Biotoptyp WWT (Tide-Weiden-Auwald) erfolgte. Auch BAT (Gebüsch) weist im Zusammenhang mit FWR(v) eine hohe Veränderungsquote auf. Zwar können auch hier vereinzelte Fehlklassifikationen nicht gänzlich ausgeschlossen werden (insbesondere in Schattenbereichen), aber soweit visuell prüfbar, sind über 90 % eindeutig auf reale Wandlungen zurückzuführen.



Abbildung 2: Grafische Darstellung der Veränderung (2000-2002) der Flusswatt-Röhrichte im Heuckenlock (Ausschnitt) (GÄHLER 2006)

Inwiefern dieser identifizierte Verlust auf anthropogenen oder natürlichen Einflüssen beruht, kann mittels dieser Auflistung jedoch nicht beurteilt werden. Da die Unterelbe ein sehr dynamisches Flusssystem ist und die Veränderungen der Topographie und der ufernahen Vegetation von daher systemimmanent sind, müssen die aktuellen Veränderungen der Röhrichte mit ihrer historischen Entwicklung an der tidebeeinflussten Unterelbe verglichen werden (vgl. BFG 2005). Die vorliegenden Klassifikationen bieten hierfür eine hervorragende Datengrundlage, die von Landschaftsökologen inhaltlich bewertet werden müssen.

#### 2.3 Zusammenfassende Bewertung

Multitemporale Analysen von Biotoptypenklassifikationen, die auf Basis von höchst auflösenden Flugzeugscannerdaten und der entwickelten Auswertestrategie erzeugt wurden, sind möglich. Durch einen Vergleich der erzielten Klassifikationsergebnisse von zwei Auswertungen aus den Jahren 2000 und 2002 können kleinste Veränderungen der Bestände identifiziert und quantifiziert werden.

Im Gegensatz zu einem Vergleich konventioneller Kartierungen bzw. einer Gegenüberstellung von Kartierung und Klassifikation sind die Differenzen bei einer Bilanzierung nur marginal durch die Erfassungsmethode und/oder -maßstäbe verursacht. Somit entsprechen quantitative Gegenüberstellungen sowie Gewinn- und Verlustberechungen den realen Veränderungen der Bestände und müssen nicht manuell überarbeitet werden. Daher eignen sich die erzielten Klassifikationsergebnisse für ein präzises Biotoptypenmonitoring und der Verarbeitungsprozess der Bilanzierung wird erleichtert und beschleunigt.

Es muss jedoch konstatiert werden, dass neben einer Quantifizierung der Veränderung eine inhaltliche Bewertung der Abweichungen erfolgen muss. Eine Analyse und Bewertung der Veränderungsparameter muss für die einzelnen Biotoptypenklassen erfolgen, wobei sowohl eine Betrachtung der räumlichen Lage als auch der summierten Flächen sinnvoll sind. Hierbei ist je nach Fragestellung eine Aggregation von Biotoptypen zweckdienlich, z.B. zu Haupteinheiten.

# 3 Literaturverzeichnis

- BALZER, S. 2000: Internationale Schutzgebietssysteme, insbesondere Natura 2000 als Bestandteil eines bundesweiten Vorrangflächenkonzepts. - In: Ssymank, A. (Bearb.): Vorrangflächen, Schutzgebietssysteme und naturschutzfachliche Bewertung großer Räume in Deutschland. (=Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz, 63). S. 147-168.
- EHLERS, M., GÄHLER, M. & R. JANOWSKY, 2006: Automated Techniques for Environmental Monitoring and Change Analyses for Ultra High Resolution Remote Sensing Data. - In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 7, S. 835-544.
- GÄHLER, M. & J. SCHIEWE, 2006: Bestimmung der Klassifikationsgüte für räumlich hoch auflösende Fernerkundungsszenen. -In: Publikationen der DGPF (Jahrestagung Berlin, 2006), 15, S. 37-44.
- GÄHLER, M., 2006: Biotoptypenerfassung auf Basis digitaler höchst auflösender Fernerkundungsdaten (E-Dissertation Universität Osnabrück).
- LUNETTA, R., 1999: Applications, Project Formulation and Analytical Approach. –In: Lunetta, R. & Elvidge, C. (Hrsg.): Remote Sensing Change Detection – Environmental Monitoring. Methods and Application. London, S. 1-19.
- MAS, J.F., 1999: Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. In: International Journal of Remote Sensing, 1, S. 139-152.
- STRUNZ, G. & GÜLS, I., 1999: Einsatz von Fernerkundungsmethoden f
  ür das Monitoring im Naturschutz. - In: Blaschke, T. (Hrsg.): Umweltmonitoring und Umweltmodellierung. GIS und Fernerkundung als Werkzeuge einer nachhaltigen Entwicklung. Heidelberg, S. 69-81.

# Analyse von ASAR APP Zeitserien in Sibirien zur Optimierung der Waldkartierung – Eine Studie im Rahmen von GSE Forest Monitoring

#### CHRISTIAN THIEL<sup>1</sup>, CAROLIN THIEL<sup>2</sup>, RALF KNUTH<sup>3</sup> & CHRISTIANE SCHMULLIUS<sup>4</sup>

Zusammenfassung: Russland besitzt mit 22% den weltweit größten Anteil an der globalen Waldbedeckung. Innerhalb Russlands ist der Distrikt Irkutsk durch einen besonders hohen Waldanteil von 82% gekennzeichnet. Damit trägt er 10% zur gesamten Waldfläche Russlands bei. Die staatliche Forstagentur im Distrikt Irkutsk (FSI) besitzt daher immenses Interesse an der Überwachung der Waldbewirtschaftung. Momentan werden sämtliche Walddaten dezentral erhoben, die Aktualisierung erfolgt nur alle 10–15 Jahre. Dabei können Störungen wie Feuer, Windbruch oder Insektenbefall nicht oder nur unzureichend erfasst werden. Ein weiteres großes Problem stellen illegale Abholzungen dar. Das derzeitige Potential der Fernerkundung kann bei einem Großteil dieser Probleme Abhilfe schaffen.

Im Rahmen von GSE Forest Monitoring werden Endnutzer mit bestimmten Walddaten beliefert. Diese Walddaten werden dabei von den Service Anbietern aus verschiedenartigen Fernerkundungsdaten abgeleitet. Für den Service in Russland werden ENVISAT ASAR APP Daten (HH/HV, Swaht 7) verwendet. Die Ableitung der Waldinformationen anhand dieser SAR Daten wird kontinuierlich optimiert. Dabei steht nicht nur die Klassifikationsprozedur, sondern auch die Datenauswahl im Sinne des optimalen Aufnahmedatums im Fokus. Zur Klärung dieser Fragestellung wird die Dynamik der SAR Daten einer saisonübergreifenden Zeitserie untersucht. Diese Studie erfolgt im Rahmen des GSE Forest Monitoring Projektes (GSE FM). GSE FM ist ein Schlüsselement im Programm Global Monitoring for Environmental and Security (GMES) Service Elements der ESA.

# 1 Einleitung

Russland besitzt mit 22% die weltweit größten Waldressourcen. Eine der waldreichsten Regionen ist der Bezirk (russisch: Oblast) Irkutsk, dessen Waldflächen über 10% zum gesamten russischen Forstbestand beitragen. Mehr als 82% von Oblast sind mit Borealen Wäldern bedeckt. Derzeit werden alle Waldinformationen auf lokaler Ebene alle 10-15 Jahre gesammelt und zu Waldinventaren zusammengefasst. Große Veränderungen im Waldmanagement, hervorgerufen durch legale und illegale Abholzung, oder natürliche Beeinträchtigungen durch Waldbrände, Insektenbefall und Sturmschäden treten häufig auf. Solche kurzfristigen Veränderungen werden nicht ausreichend von den staatlichen Forstverwaltungen erfasst. Fernerkundungstechniken aus dem Weltraum sind geeignet, um diese Restriktionen zu beheben (VASCHUK & SHVIDENKO 2006).

Diese Arbeit wurde im Rahmen des ESA Projektes "GSE-Forest Monitoring" (ESTEC Contract 19277/05/I-LG) finanziert.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Thiel, Ch.: Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fernerkundung, Grietgasse 6, 07743 Jena

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Thiel, Ca.: Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fernerkundung, Grietgasse 6, 07743 Jena

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Knuth, R.: Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fernerkundung, Grietgasse 6, 07743 Jena

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Schmullius, C.: Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fernerkundung, Grietgasse 6, 07743 Jena

#### 1.1 GSE Forest Monitoring – Projekt Hintergrund

GSE Forest Monitoring (FM) ist Bestandteil der Initiative Global Monitoring for Environmental and Security (GMES) der ESA. Das erste Stadium von GSE FM wurde 2003 initiiert, danach folgte 2005 die zweite Stufe mit einer Dauer von drei Jahren. Das Internationale Konsortium wird von der GAF AG geleitet und besteht aus 18 Dienstleistungsunternehmen und 25 Endnutzern. Hauptziel ist die Lieferung von kundenspezifischen, politisch relevanten, operationellen und auf Fernerkundungsdaten basierenden Produkten. Einsatzgebiete sind Klimaänderung, nachhaltiges Forstmanagement sowie andere Umwelt- und Naturschutzaspekte. Damit nachhaltiges kosteneffektives Waldmanagement für verschiedene Länder möglich ist und eine fundierte Unterstützung für politische Entscheidungen zur Verfügung steht, werden die bereitgestellten Produkte und Services entsprechend validiert und standardisiert (HÄUSLER & GOMEZ 2005).

#### 1.2 Der Service Gebiet Russland

Alle Dienstleistungen für Russland beziehen sich auf den Irkutsk Oblast (Abb. 1 & 3). Die Informationen über die aktuelle Waldbedeckung und deren Veränderungen werden aus hochauflösenden ENVISAT ASAR APP IS7 (HH/HV) sowie LANDSAT TM Daten generiert. Das gelieferte Produktpaket beinhaltet eine Waldgebietskarte, eine Waldveränderungskarte sowie eine Abholzungs- und Waldbrandflächenkarte. Die Waldgebietskarte wurde aus aktuellen ASAR Daten abgeleitet. Alle anderen Karten wurden unter Zuhilfenahme von LANDSAT TM Daten aus den 1990er Jahren erstellt. Die Anforderungen an die Produkte umfassen eine geometrische Mindestgenauigkeit (RMS < 30 m) und eine minimale Kartiereinheit von 1 ha. Beiden Bedingungen kann entsprochen werden. Der Schwellwert der thematischen Genauigkeit beträgt 90% für Karten, die keine Veränderung darstellen und 85% für Change Karten. Innerhalb von drei Jahren werden alle Produkte für ein Gesamtgebiet von 200.000 km<sup>2</sup> generiert. Diese Produkte werden in die lokale Forstinventurdatenbank aufgenommen. Im ersten Jahr wurden über 50.000 km<sup>2</sup> prozessiert, für die folgenden Jahre wird die Fläche jeweils um ~20% pro Jahr erweitert (Abb. 1).



Abbildung 1: Gebiete der Phasen 1 und 2 innerhalb des Irkutsk Oblast, die schwarzen Rahmen markieren die Umrisse der ASAR Zeitserien, die Punkte kennzeichnen repräsentative Klimastationen

#### 1.3 SAR Daten Prozessierung und Kartierungsansatz

Die Prozessierungskette der SAR Daten besteht aus Vorprozessierung (Kalibrierung, Orthorektifizierung, topographische Normalisierung (ZYL et al. 1993, STUSSI et al. 1995) und Ratio Berechnung), Klassifizierung, Nachbearbeitung, Change Detection und manueller Trennung von Abholzungs- und Brandflächen. Datenanalyse und Klassifikation basierten auf Bildobjekten (Segmenten). Die Segmente wurden mittels Multiresolution Segmentation (BAATZ & SCHÄPE 2000, B<sub>ENZ</sub> et al. 2004) abgeleitet. Eine ASAR Szene (drei Kanäle: HH/HV/Ratio[HH/HV]) bildet die Grundlage für die Detektion von bewaldeten/unbewaldeten Gebieten, dabei beinhaltet die Klasse "unbewaldet" sowohl abgeholzte und verbrannte Waldflächen, als auch alle weiteren unbewaldeten Flächen (Siedlung, Wasser, Landwirtschaft etc.). Damit die kleinstmögliche Kartiereinheit von 1 ha garantiert werden kann, wurde auf den Einsatz eines Specklefilters verzichtet. Die Verwendung von Bildsegmenten umgeht das Speckle-Problem. Die überwachte Klassifikation (*nearest neighbour*) wurde anhand der  $\sigma^0$  Werte in dB durchgeführt. Damit die geforderte Kartengenauigkeit erreicht werden konnte, war eine manuelle Nachbearbeitung notwendig.

Für die Produktion der Change-Karten wurden archivierte LANDSAT TM Szenen aus den 1990er Jahren mit der gleichen Prozedur klassifiziert. Die Klassifikationsergebnisse wurden dann mit den neu erstellten SAR-Waldkarten kombiniert und Veränderungskarten wurden erzeugt (vgl. Abb. 2). Auf Basis der erstellten SAR-Waldkarten, welche die Abholzungs- und Waldbrandgebiete als Mischklasse enthalten, wurden separate Karten für Rodungs- und Brandflächen produziert. Die Trennung der Mischklasse wurde durch eine Analyse basierend auf Objektform und zusätzlichen Informationen zu Waldbränden erreicht.



Abbildung 2: Links: Beispiel einer Waldkarte (2006); grau: Wald, schwarz: Nicht-Wald. Rechts: Beispiel einer Waldveränderungskarte (1990-2006); schwarz: Entwaldung, grau: Wald, weiß: Waldnachwuchs, dunkelgrau: Nicht-Wald

#### 1.4 Gebietsbeschreibung

Der Irkutsk Oblast befindet sich in Zentralsibirien in Russland (Abb. 3). Es erstreckt sich von 52° bis 64° Nord und von 96° bis 118° Ost, die Gesamtfläche beträgt etwa 739.000 km<sup>2</sup>. Das mittelsibirische Plateau im südlichen Teil des Territoriums wird von Bergen mit Höhen von bis zu 1700 m dominiert. Dagegen ist die nördliche Region weitgehend flach mit Höhen von bis zu 500 m. Der Bezirk Irkutsk ist von typischen Taigawäldern (Birke, Espe, Kiefer, Lärche etc.) bestanden. Die gegenwärtige Waldüberwachung wird durch die Durchführung von periodischen Forstinventuren alle 10 bis 15 Jahre gewährleistet (VASCHUK & SHVIDENKO 2006). Die Region Irkutsk Oblast erfährt kontinentalklimatische Konditionen. Die jährliche Niederschlagsmenge ist meist niedriger als 450 mm, die Winter sind kalt und trocken, während des warmen Sommers fällt der Hauptniederschlag. Drastische kurzzeitliche Temperaturvariationen sind häufig. Aus Abbildung 4 können die Klimaverhältnisse der Region anhand der Stationen Tulun und Vitim abgelesen werden. Diese Stationen sind repräsentativ für das von den ASAR Zeitreihen abgedeckte Areal (vgl. Abb.1).



Abbildung 3: Lage des russischen Service Gebietes (Irkutsk Oblast)



Abbildung 4: Klimadaten für die Stationen Tulun (links) und Vitim (rechts) des Jahres 2006. Wochenmittel für Tmax und Schneehöhe, Wochensummen für Niederschlag

#### 1.5 SAR Zeitserien

Wie in Abbildung 6 dargestellt setzt sich die Zeitserie aus zwei aneinander grenzenden Szenen der Tracks (376 und 194) bei gleichem Frame (2493) zusammen. Die gesamte Zeitreihe besteht aus sechs (je über das Jahr verteilte) Aufnahmezeitpunkten für jede Szene (vgl. Tabelle 1).

# 2 Analyse der ASAR APP Zeitreihen

#### 2.1 Vorbedingungen

An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass es sich um eine anwendungsorientierte Studie handelt. Sie dient dem Ziel, folgende Frage für die Produkterstellung im borealen Raum Irkutsk Oblast zu beantworten: Wann ist der optimale Aufnahmezeitpunkt für intensitätsbasierte Unterscheidung hinsichtlich Wald/Nicht-Wald? Durch eine Reihe von L-Band Studien (z.B. LECKIE & RANSON 1998, RAUSTE 2005, SANTORO et al. 2006) konnte gezeigt werden, dass Sommerdaten grundsätzlich besser geeignet sind als Winterdaten. Im C-Band jedoch wird die Detektion von Nicht-Wald aufgrund z.B. restlicher Vegetation auf Rodungsflächen oder überlebender Bäume auf Brandflächen durch eine (zu) hohe Rückstreuung erschwert. Es gibt eine Vielzahl von gegenläufigen Faktoren und Prozessen, welche unbedingt bei der Beantwortung der oben gestellten Frage berücksichtigt werden müssen. Beispiele dafür sind (LECKIE & RANSON 1998):

- Welche Eigenschaften haben die Abholzungs- und Brandflächen (verbleibende Vegetation, Oberflächenrauhigkeit etc.)?
- Welche Eigenschaften besitzt der Wald (Alter, Wuchsdichte, Baumart etc.)?
- Sind die Baumkronen gefroren?
- Wie hoch sind Bodenfeuchte und Oberflächenrauhigkeit (bewaldete und waldfreie Flächen)?
- Gibt es eine signifikante Schneedecke und wenn ja, welche Eigenschaften hat der Schnee? Spielen Auftauprozesse eine Rolle? Existiert Schnee auf den Baumkronen? Absorbiert der Schnee die Mikrowellenstrahlung oder fungiert er als Oberflächenstreuer?
- Gibt es Niederschlagseffekte und welchen Einfluss hat die Topographie?



Tab. 1: ASAR Zeitserien, Akquisitionszeitpunkte pro Szene

Abbildung 5: ASAR Zeitserien: 2 benachbarte Szenen mit je 6 Aufnahmen, RGB = HH-HV-HV (März)

#### 2.2 Signaturanalyse

Der Ausgangspunkt der Zeitserienanalyse bestand in einer ersten visuellen Abschätzung. Diese Analyse hat bereits die Bedeutung des Aufnahmezeitpunktes für eine Waldklassifizierung hervorgehoben, da sich weder Sommer- noch Winterdaten als besonders geeignet erwiesen haben. Der höchste Kontrast ist in der April-Szene zu erkennen. Eine Signaturanalyse wurde durchgeführt, um diese Beobachtung zu verifizieren. Um die zeitliche Variabilität von bewaldeten und unbewaldeten Gebieten zu erfassen, wurden die Klassen "(überwiegend) Nadelwald", "(überwiegend) Laubwald" und "junger Wald" (Alter etwa 10 Jahre) gebildet. Unbewaldete Gebiete wurden in "Kahlschlag" und "Brandfläche" unterteilt. Zusätzlich wurden die Klassen "Wasser", "Siedlung" und "Landwirtschaft" eingeführt. Für jede dieser Klassen wurden 15 Stichproben pro Szene generiert. Jede Stichprobe wurde als ein Bildobjekt erfasst. Aus diesem konnte dann der durchschnittliche Rückstreukoeffizient für weitere statistische Berechnungen ermittelt werden.

Abbildung 6 (links) zeigt den durchschnittlichen Rückstreukoeffizient für jedes Aufnahmedatum, aufgeteilt für jede Landbedeckungsklasse und die dazugehörige Polarisation für die östliche Szene. Dargestellt sind drei Waldklassen, zwei Nicht-Wald Klassen und die Klassen "Siedlung" und "Wasser". Landwirtschaft tritt in der östlichen Szene nicht auf. Offensichtliche Schwankungen der Rückstreuung im zeitlichen Verlauf sind für alle Klassen sichtbar. Die hohen Rückstreuwerte für Wasser während der Wintermonate haben ihre Ursache darin, dass das Wasser während dieser Zeit eisbedeckt ist. Alle Waldklassen haben ihr Maximum während der Wachstumsperiode, ganz besonders gilt dies für "Laubwald" und "jungen Wald". Da im Winter die Baukronen gefroren, ist auch die Rückstreuung niedriger. Die Differenz zwischen Minimum und Maximum der Rückstreuung für "Laubwald" und "jungen Wald" beträgt 4 dB für HH und 5 dB für HV. Für "Nadelwald" beträgt sie lediglich 2 dB/4 dB (HH/HV). Bei den Nicht-Wald Klassen "Kahlschlag" und "Brandfläche" konnte ein ähnlicher zeitlicher Verlauf der Rückstreuung verzeichnet werden. Hohe Rückstreuwerte werden während der Wachstumsphase registriert; niedrige dagegen während des Winters und Frühjahrs. Das absolute Minimum liegt im April. Die Differenz zwischen minimaler und maximaler Rückstreuung beträgt 4 dB/5 dB (HH/HV). Hinsichtlich des Wertebereichs und der zeitlichen Dynamik der Rückstreuintensität ist das Verhalten von Waldund Nicht-Waldflächen vergleichbar. Zudem unterscheiden sich deren Rückstreuintensitäten nicht signifikant zu den jeweiligen Aufnahmezeitpunkten (0-2 dB). Die einzige Ausnahme bildet die April-Aufnahme (4 dB/5 dB für HH/HV).



Abbildung 6: Zeitliche Variabilität der Radarrückstreuung separiert nach Landbedeckung (links: östliche Szene, rechts: westliche Szene)

Abbildung 6 (rechts) zeigt die gleichen Daten einschließlich der Klasse "Landwirtschaft" für die westliche Szene. Die sehr hohe zeitliche Dynamik für "Landwirtschaft" spiegelt den Anbauzyklus wieder. Alle anderen Klassen zeigen ein ähnliches Verhaltensmuster wie in der östlichen Szene. Ungünstigerweise gibt es für den April keine Aufnahme.

In Abbildung 7 werden die temporalen Variationen der Rückstreuung der zwei Schlüsselklassen dargestellt. Die "Wald" Klasse wurde aus der Zusammenlegung der drei oben erwähnten Waldklassen gebildet; die "Nicht-Wald" Klasse beinhaltet die Signaturen der oben beschriebenen Klassen "Kahlschlag" und "Brandfläche". Die Fehlerbalken stehen für Minimum und Maximum bezogen auf die mittlere Rückstreuung der Bildsegmente. Saisonale Effekte sind leicht zu erkennen. Die durchschnittliche Rückstreuung fällt im Winter und steigt im Sommer. Der zeitliche Unterschied der Rückstreuung ist für die Kreuzpolarisation größer. Die Differenz der durch-

schnittlichen Rückstreuung zwischen bewaldeten und unbewaldeten Gebieten ist im Winter und bei Kreuzpolarisation größer. Für Aufnahmezeitpunkte während des Sommers ist die Rückstreuintensität für bewaldete und unbewaldete Gebiete annähernd gleich. Der Aufnahmezeitpunkt mit den größten Unterschieden in der Rückstreuung zwischen bewaldeten und unbewaldeten Gebieten ist der April.



Abbildung 7: Zeitliche Variabilität der Radarrückstreuung für Wald und Nicht-Wald (beide Szenen)

#### 2.3 Trennbarkeitsanalyse

Für eine objektive und genaue Analyse wurde eine Berechnung der Trennbarkeit für die bewaldeten/unbewaldeten Gebiete durchgeführt. Die skalierte Jefferies-Matusita Distanz wurde für diese Berechnung gewählt (1,0 = Signaturen sind eindeutig trennbar, 0,0 = Signaturen sind nicht voneinander unterscheidbar). Diese Analyse bezieht sich auf Bildpixel. Die Signaturen für jede einzelne Klasse wurden aus den oben beschriebenen Stichproben abgeleitet. Die Analyse musste auf Pixelebene durchgeführt werden, damit eine sinnvolle Abstufung der Trennbarkeit für die verschiedenen Aufnahmezeitpunkte möglich war. Die Tabellen 2 und 3 fassen die Trennbarkeitsauswertung zusammen. Berechnet wurde die Trennbarkeit zwischen den Nicht-Waldklassen "Brandfläche" und "Kahlschlag" und den Waldklassen "Wald" (Mischklasse aus Nadel- und Laubwald) und "junger Wald".

	Kahl- schlag vs. jun- ger Wald	Brand- flächen vs. jun- ger Wald	Kahl- schlag vs. Wald	Brand- flächen vs. Wald		Kahl- schlag vs. jun- ger Wald	Brand- flächen vs. jun- ger Wald	Kahl- schlag vs. Wald	Brand- flächen vs. Wald
14.02	0,26	0,36	0,38	0,38	05.03	0,15	0,18	0,48	0,49
21.03	0,24	0,40	0,30	0,39	14.05	0,17	0,30	0,14	0,33
25.04	0,76	0,78	0,77	0,79	18.06	0,07	0,17	0,12	0,10
04.07	0,34	0,43	0,32	0,40	23.07	0,15	0,05	0,28	0,20
12.09	0,36	0,57	0,36	0,57	27.08	0,06	0,09	0,15	0,07
21.11	0,12	0,29	0,23	0,31	05.11	0,14	0,19	0,36	0,40

Tab. 2 und Tab. 3: Trennbarkeit der Schlüsselklassen (östliche Szene links, westliche Szene rechts)

Eine hohe Trennbarkeit ist für jede Spalte angestrebt, beispielsweise muss "junger Wald" von unbewaldeten Flächen unterschieden werden können. Tabelle 4 fasst die Separierbarkeit für bewaldete und unbewaldete Gebiete zusammen. Grundsätzlich herrscht Übereinstimmung zwischen der Trennbarkeitsanalyse und der Signaturanalyse. Intrasaisonale Variationen (besonders während der Vegetationsperiode) übersteigen die generelle Separierbarkeitsdifferenz zwischen Sommer und Winter. Die Ursache dafür sind kurzfristige wetterbedingte Veränderungen (z.B. Niederschlagseffekte, vgl. MÄTZLER 1987). Solche Variationen sind im Winter geringer. Ebenfalls ist im Winter die Klassentrennbarkeit geringfügig höher als im Sommer (vgl. LECKIE & RANSON 1998, MÄTZLER 1987). Deshalb sollten ASAR APP basierte Untersuchungen im borealen Raum mit dem Ziel, bewaldete von nicht bewaldeten Gebieten zu unterscheiden, eher auf Winterdaten (bzw. Frühjahrsdaten) zurückgreifen. Auffällig sind die hohen Trennbarkeitswerte für den 25. April. Darüber hinaus wurden hohe Trennbarkeiten (Trennung Wald/nicht Wald) für den späten April/ bzw. den frühen Mai bei etlichen anderen akquirierten Szenen festgestellt (hier standen keine Zeitserien zur Verfügung). Diese Szenen sind in Tabelle 5 aufgeführt.

14.02.2006 0	,38	
05.03.2006 0	,49	
21.03.2006 0	,34	
25.04.2006 0	,78	
14.05.2006 0	,23	
18.06.2006 0	,11	
04.07.2006 0	0,36	
23.07.2006 0	0,24	
27.08.2006 0,11		
12.09.2006 0,46		
05.11.2006 0	,38	
21.11.2006 0,27		

Tab. 4: und Tab. 5: Trennbarkeit von	Wald/Nicht Wald (links),	, weitere Szenen mit hoher Tr	ennbarkeit
Wald/Nicht Wald (rechts)			

Track	Frame	Datum	Koord. Mittelp.
104	2421	25.04.2006	59,24 / 104,23
104	2439	25.04.2006	58,35 / 103,96
104	2493	25.04.2006	55,70 / 103,20
104	2511	25.04.2006	54,82 / 102,96
104	2529	25.04.2006	53,93 / 102,73
61	2493	22.04.2006	55,70 / 104,63
61	2511	22.04.2006	54,82 / 104,39
61	2527	22.04.2006	54,68 / 104,35
333	2421	11.05.2006	59,24 / 104,94
333	2439	11.05.2006	58,35 / 104,67
147	2457	28.04.2006	58,27 / 102,50
147	2421	28.04.2006	59,24 / 102,79
147	2439	28.04.2006	58,35 / 102,52
190	2477	01.05.2006	56,46 / 100,53
190	2439	01.05.2006	58,35 / 101,08
190	2485	01.05.2006	54,85 / 100,09
190	2457	01.05.2006	58,27 / 101,06

# 3 Diskussion

Die Szene vom 25. April und vermutlich auch die in Tabelle 5 gelisteten Szenen fallen in die Zeit der Schneeschmelze (siehe Abb. 8). Einige von den in Tabelle 5 aufgeführten Szenen (z.B. die am 5. Mai aufgenommenen) liegen weiter nördlich, deshalb können die Klimadaten aus den südlicheren Klimastationen nur als Annäherung verwendet werden. Für die nördliche Region sind bisher keine weiteren Klimadaten verfügbar.

Während der Schneeschmelze herrschen Bedingungen, die nassen Schnee begünstigen. Dies gilt insbesondere dann, wenn Regen auf die oberste Schneeschicht fällt, so wie es im April 2006 der Fall war. Die Baumkronen sind zu dieser Zeit in der Regel schneefrei, nicht mehr gefroren und teilweise schon photosynthetisch aktiv. Auf waldfreien Flächen ist die bodennahe Vegetation kaum entwickelt. Die Schneedecke ist feucht und mehr oder weniger eben. Einfallende Radarwellen werden spiegelnd reflektiert oder absorbiert. Deshalb ist die Rückstreuung von diesen Oberflächen ziemlich gering. Im Gegensatz dazu steht die mittlere bis hohe Rückstreuung von den Baumkronen (vgl. Abb. 9). Diese speziellen Bedingungen ermöglichen eine Unterscheidung von bewaldeten/unbewaldeten Gebieten durch den Einsatz von C-Band SAR Daten.



Abbildung 8: Klimadaten für die Stationen Tulun (links) und Vitim (rechts) des Jahres 2006. Tageswerte



Abbildung 9: Streuprozesse während der Schneeschmelze

Während der Vegetationsperiode wird eine derartige Unterscheidung durch Bodenvegetation und hohen Oberflächenrauhigkeit in Nichtwaldgebieten verhindert. Während des Winters ist die Baumkrone gefroren und generiert geringere Rückstreuwerte, hierdurch wird der Kontrast zwischen bewaldeten und unbewaldeten Flächen ebenfalls reduziert. Hinzu kommt, dass in Nicht-Waldgebieten eine höhere Rückstreuung vom Boden (Interpenetration von sehr trockenem Schnee) oder durch die diffuse Streuung innerhalb der (inhomogenen) Schneeschicht entsteht (LECKIE & RANSON 1998, WAY et al. 1990).

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Die sibirische Boreale Region ist durch Kontinentalklima gekennzeichnet. Dies bedeutet lange und kalte Winter mit deutlicher Schneeakkumulation. Der Auftauprozess beginnt normalerweise plötzlich und dauert 1-4 Wochen. Wenn C-Band Sensoren für eine Wald/Nicht-Wald Unterscheidung in dieser Region verwendet werden sollen, ist vermutlich die Phase der Schnee-

schmelze die beste zeitliche Wahl für die Datenaufnahme. Kürzere Wiederholungsraten der Sensoren würden sicherstellen, dass der angestrebte Akquirierungszeitraum eingehalten werden kann. Der Beginn der Schneeschmelze variiert regional und zeitlich, deshalb sollten Wetter- und Schneebedingungen bereits vor der Datenaufnahme überprüft werden.

Für die dritte Phase von GSE FM werden PALSAR Daten für die Service Produktion eingeführt. Die zu kartierenden Fläche beträgt im dritten Jahr 90.000 km<sup>2</sup>. L-Band (ALOS) Winter Kohärenz Bilder (2006/2007) werden den Dateninput ergänzen. Die Verwendung von L-Band Daten sollte den Aufwand der manuellen Nachbearbeitung minimieren. Außerdem wird die Kombination von ASAR C-Band und PALSAR L-Band Daten für eine Produkterweiterung angestrebt.

# 5 Literaturverzeichnis

VASCHUK L.N. & SHVIDENKO, A., 2006: Dynamics of Forest of Irkutsk. Printing House No. 1.

- HÄUSLER, T. & GOMEZ, S., 2005: GMES Service Element for Forest Monitoring; Achievements in the European Context and Prospects for Users in Other Nations. Proc. 31st Intern. Symp. on Remote Sensing of Environment: Global Monitoring for Sustainability and Security, June 20-24 2006, St. Petersburg, Russia.
- ZYL, J.J., CHAPMAN, B.D., DUBOIS, P. & SHI, J., 1993: The effect of topography on SAR calibration. IEEE Trans Geosc. Remote Sensing, 31(5): 1036-1043.
- STUSSI, N., BEAUDOIN, A., CASTEL, T. & GIGORD, P., 1995: Radiometric correction of multiconfiguration spaceborne SAR data over hilly terrain. Proc. CNES/IEEE Int. Symp. on the Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, 10-13 October, Toulouse, France.
- BAATZ, M. & SCHÄPE, A., 2000: Multiresolution segmentation an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. (Ed. Strobl, J., Blaschke, T. & Griesebner, G.) Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, Germany.
- BENZ, U.C., HOFMANN, P., WILLHAUCK, G., LANGENFELDER, I. & HEYNEN M., 2004: Multiresolution, objectoriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing, 58: 239-258.
- LECKIE, D.G. & RANSON, K.J., 1998: Forestry applications using imaging radar. (Eds. Henderson, F.M. & Lewis, A.J.) Principles and applications of imaging radar, 3rd edn, Wiley, New York: 435-510.
- RAUSTE, Y., 2005: Multi-temporal JERS SAR data in boreal forest biomass mapping. Remote Sensing of Environment, 97: 263 – 275.
- SANTORO, M., ERIKSSON, L., ASKNE, J. & SCHMULLIUS, C., 2006: Assessment of stand-wise stem volume retrieval in boreal forest from JERS-1 L-band SAR backscatter. Int. J. Remote Sensing, 27: 3425-3454.
- WAY, J., PARIS, J. KASISCHKE, E., SLAUGHTER, C., VIERECK, L. CHRISTENSEN, N. DOBSON, M. C., ULABY, F., RICHARDS, J. MILNE, A., SIEBER, A. AHERN, F.J., SIMONETT, D. S., HOF-FER, R., IMHOFF, M. & WEBER, J., 1990: The Effect of Changing Environmental Conditions on Microwave Signatures of Forest Ecosystems: Preliminary Results of the March 1988 Alaskan Aircraft SAR Experiment. Int. J. Remote Sensing, **11**(7): 1119-1144.
- MÄTZLER, C., 1987: Applications of the Interaction of Microwaves with the natural snow cover. Remote Sensing Reviews, **2**: 259-387.

# Automatic Dodging of Aerial Images

# MARTIN DRAUSCHKE<sup>1</sup>, ANSGAR BRUNN<sup>2</sup>, KAI KULSCHEWSKI<sup>3</sup> & WOLFGANG FÖRSTNER<sup>1</sup>

Abstract: We present an automated approach for the dodging of images, with which we edit digital images as it is usually done with analogue images in dark-rooms.

Millions of aerial images of all battle fields were taken during the Second World War. They were intensively used, e.g. for the observation of military movements, the documentation of success and failure of military operations and further planning. Today, the information of these images supports the removal of explosives of the Second World War and the identification of dangerous waste in the soil. In North Rhine-Westphalia, approximately 300.000 aerial images are scanned to handle the huge amount of available data efficiently. The scanning is done with a gray value depth of 12 bits and a pixel size of 21 µm to gain both, a high radiometric and a high geometric resolution of the images. Due to the photographic process used in the 1930s and 1940s and several reproductions, the digitized images are exposed locally very differently. Therefore, the images shall be improved by automated dodging.

Global approaches mostly returned unsatisfying results. Therefore, we present a new approach, which is based on local histogram equalization. Other methods as spreading the histogram or linear transformations of the histogram manipulate the images either too much or not enough. For the implementation of our approach, we focus not only on the quality of the resulting images, but also on robustness and performance of the algorithm. Thus, the technique can also be used for other applications concerning image improvements.

#### 1 Introduction

#### 1.1 Allied images for the disposal of explosives of the Second World War

Millions of aerial images of all battle fields were taken during the Second World War (WWII). Especially Great Britain already started taking photographs of parts of Germany even before the beginning of the Second World War. During the war the organization of the aerial reconnaissance was constantly improved (BABINGTON SMITH, 2004). The number of images increased rapidly (LUA NRW, 2006).

The aerial images were intensively used, e.g. for the observation of military movements, the documentation of success and failure of military operations or the planning of further strategies. The films were developed in the field immediately after landing. A courier delivered them to the headquarters, often only a few hours after the landing of the reconnaissance plane (STANLEY, 1981).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Department for Photogrammetry, Institute of Geodesy and Geoinformation, University of Bonn, Nussallee 15, 53115 Bonn, martin.drauschke@uni-bonn.de, wf@ipb.uni-bonn.de

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Kampfmittelbeseitigungsdienst Westfalen-Lippe, Bezirksregierung Arnsberg, In der Krone 31, 58099 Hagen, ansgar.brunn@bezreg-arnsberg.nrw.de

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Kampfmittelbeseitigungsdienst Rheinland, Bezirksregierung Düsseldorf, Färberstraße 136, 40223 Düsseldorf, kai.kulschewski@bezreg-duesseldorf.nrw.de

Today, these images support the removal of explosives of the Second World War or the identification of dangerous waste in the soil. North Rhine-Westphalia (NRW) has two bomb disposal services which identify, detect, remove and destroy not yet exploded bombs and other munitions. The first step of the removal of bombs is image interpretation. The services archive almost 300,000 allied images. The photo interpreter and geodesists identify in these images bombed areas, signatures of unexploded bombs and of military infrastructure and reference this data. Detection and removal units complete the job in the field.

#### 1.2 Digitization of the archive of analog allied images

Up to now analogue photo copies have been used for the image interpretation. The image interpretation task is done separately for each site. For each multi-temporal image interpretation from 10 up to several hundreds of images have to be analyzed. Therefore the explosive disposal units put a high effort in managing the analogue archives at the moment. This effort will increase when additional images will be available from recently opened archives (CARLS & MÜLLER, 2007).

In the future only digital images will be used. All sites will be interpreted from digital images. Therefore all images have to be digitized with high accuracy resulting from high demands of interpretation quality for the bomb disposal task, i.e. a high radiometric contrast to identify small holes in the bare soil which result from the penetration of the unexploded bombs, and a high geometric accuracy to get precise coordinates of possible places of unexploded bombs.

In addition to the demands resulting from the task of bomb disposal, additional demands result from economical aspects: no human interaction should be needed for the scanning of each image nor for the improvement of the scanned images. These efforts point out that a high degree of automation of the process is needed. The large amount of images makes a priori investigations sensible and economical interesting.

#### 1.3 Overview of the rest of the paper

In the following we will describe the scanning process. In chapter 3 we will report on several tests of image improvement methods which use intuitive and commercially available algorithms. Afterwards in chapter 4 we will present results and demonstrate some properties. This paper closes with a short summary and an outlook on the further work which has to be done in the scanning project.

# 2 Automated scanning of allied images of the WWII

#### 2.1 Scanning overview

In the 1990s Germany got access to images from the British archive of allied aerial images, which nowadays is hosted at TARA<sup>4</sup>. Back then hundreds of boxes with cut aerial images were brought to Germany. Each of the borrowed images is a copy in an unknown series of copies of

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> The Aerial Reconnaissance Archives (TARA) at Keele University, <u>www.evidenceincamera.co.uk</u>, last visit: 1.5.2007

the original photographs. These copies survived somehow the confusion during and after WWII. These images were reproduced on film rolls and were archived in Germany again. Since then, they have been used to generate analogue photos for manual image interpretation of the bomb disposal units for the last 15 years. During the photographic reproduction process on paper a line-based photographic dodging was performed in a dark-room. The exposure time was calculated from the brightness of each reproduced image line.

For the scanning project the existence of the film rolls is a big benefit, because the rolls allow automatic scanning by a photogrammetric scanner. We use a unique label found on each image to identify each image on the film roll and scan the images with  $21\mu$ m resolution in 12 bits. Although the image is scanned with 12 bits, storage of the data follows in 16 bits. To avoid time-consuming and individual scan settings for each film and each image resp., only one set of parameters is used during the scan process for efficient scanning. That is why in most cases the overall image quality of the original scans is inadequate. Figure 1 gives an impression of the quality of the majority of the scanned images.

This scanning result does obviously not allow a reliable interpretation. Thus, an algorithm for image improvement has to be found. The following demands have to be satisfied by the resulting images:

- They need to be interpretable by specialists in allied image interpretation.
- They should have a nice look because they should allow a quick overview on bomb penetration and waste pollution.
- They have to reveal small structures like small holes in the ground of blinders.
- The algorithm has to adapt to the failures of the available images.
- It has to keep the geometry of the image.
- It has to be as fast as the scanning of the image.

#### 2.2 Scanning in detail and quality management of the scanned images

The aim of scanning is to optimize the information content, as well as the histogram, but not the optimization of the visual impression. Additionally, all radiometric properties of the analog images which are supposed to be scanned need to be reproduced in the digital images as good as possible. The complete reprographic range of each image is to be scanned during the scanning process.

In order to optimize the image information content, all digital images must fulfill the following general conditions: There must be no irregular swaths / scan lines and stains in the digital image, and the radiometric contrasts in the dark (shadows) and in the light image areas (clouds, snow, overexposed areas), which can be seen in the original image, must also exist in the scanned image.

Furthermore, the radiometric resolution of 16 bits must effectively be utilized. In addition the histogram of a so called inner range has to fulfill certain conditions. The inner range only contains objects which were captured during the original exposure. No superimposed fiducial marks nor any text are allowed to exist in the inner range.

The inner range has no constant offset to the unique label. In order to avoid complex individual detection of the inner range of each image, the inner range can be defined, so that the distance from the original image area on all four sides, does not exceed the value of 1,5cm.

For the optimization of the image information the guideline of the scanning contains the following items:

- The histogram of the whole scanned image has to range from 6553 to 58983. Within this range the minimum of 245 grey values must possess a frequency greater than 0,01% of the number of pixels in the inner range,
- Maximally 0,01 % of all grey values in the inner range are allowed to exceed the grey value from 1 to 6553, and the grey value from 58983 to 65535.



Figure 0. Input Image

• The grey values 0 and 65536 are not permitted.

Through the introduction of these boundary conditions, a later transformation to 8 bit is guaranteed, so that all objects of a 16 bit image taken during the photo flight are present. They can then be optimized during radiometric post-processing to avoid underexposures or overexposures in the 16 bit scanned image. The histogram derived from the 8 bit image is almost complete and the grey values from the 8 bit image are not derived from extrapolations.

# 3 Previous Work

Let *I* be the input image with  $0 \le I(x,y) \le g_{max}$  for all pixels (x,y) of the image and *H* its histogram. Fig. 1 shows a scanned aerial image of an area in North Rhine-Westphalia and Fig. 2 its histogram.

The information of the input image is not recognizable for human eyes, since over 90% of all pixels have one of the 10%-highest grey values. The scanning of the image has been adjusted in such way, that а all information is preserved during the scan process. Thus, the frame of the

fining term		N 01.0
e mer +		
	14	
Carlwell 241.9 Puel 102000		29.0

Figure 2. Histogram of input image after quantization to 8 bits.

image contains almost all the dark parts of the image. The rest of the image is too light for recognizing structures in the photographed landscape manually.

The analysis of the histogram of such an image shows that many grey values occur in the image, but most of them not more than only a few times. There is a number of small peaks in the middle of the histogram most of which result from the grey values of the image frame. The maximum in the histogram is located near the highest possible grey value  $g_{max}$ .

Finally, we denote the output image with O(x,y).

#### 3.1 Inner-range dodging with local histogram spreading

In a first approach, we use histogram spreading for improving the visibility in the images. Therefore, it is necessary to select an inner-range of an image to exclude the frame around the scene in the aerial image. The inner range has to be defined interactively due to writings on the



Figure 3. Dodging with histogram spreading. Part (a) shows the global approach, parts (b-d) show the results of an inner-range dodging with variable patch sizes. Therefore, we divided the image into 4 patches (b), 100 patches (c) or 400 patches (d) of equal size.

image and failures of image parts, also to exclude clouds, dust or reflection of sunlight. The inner range is divided into disjoint patches. For each patch, we determine the minimum and maximum gray values. Then we spread the histogram up to fixed anchor points, in which we define for 16 bit images with 65536 possible gray values 2560 as the minimum anchor point, and 62720 as the maximum. Disturbances in the image are not handled separately, thus many results show extreme discomposure. Fig. 3 shows the visibility improvements using the inner range dodging in four cases.

#### 3.2 Multidodging with local mean-shift



Figure 4. Output image of multidodging approach.

The next approach manipulates the image using a transformation based on local parameters. Therefore, we call this method multi-dodging with mean-shift.

In a first step, we smooth the input image  $I_I(x,y)$  using Gaußfilters with a very large smoothing kernel, e.g.  $\sigma = 51$ . Then, we determine a difference image D(x,y), which contains the absolute grey value differences between the original and the smoothed image, and we also determine a variance image  $\sigma_D(x,y)$ , where we store the squares of the difference.

In the second step of this method, we transform the grey values of the image by a linear transformation. The difference image D(x,y) is a good approximation of the local mean, thus we may transform the input image by the following linear function, where we adjust the image towards a constant mean and a constant variance:

$$O(x, y) = p_1 \frac{D(x, y)}{\sigma_D(x, y)} + p_2$$

We check all transformed pixel, if they are out of bounds, that means either D'(x,y) < 0 or  $D'(x,y) > g_{max}$ . The rate of all pixels which we have to correct afterwards, is low (around 3%), since we chose as parameters  $p_1 = 20,000$  and  $p_2 = 25,000$  for ingoing 16-bit-images.

The result of this approach is a strongly binarized image as shown in fig. 4. Its histogram consists of two peaks as demonstrated in fig 5.



Figure 5. Histogram of output image of multidodging approach with mean-shift.

#### 4 Results and Properties of the New Dodging Algorithm

Globally determined histogram equalizations return globally satisfying results. However the contrast in various image parts is still to low to distinguish small structures successfully. Consequently, we divide the image into p image patches  $P_i$ , with a fixed size for each patch and

$$I(x, y) = \bigcup_{i=1}^{p} P_i$$
 and  $P_i \cap P_j = \emptyset, \forall i \neq j$ 

The borders between the image patches are clearly visible after transforming each image patch by its own histogram equalization  $E_i$ . Thus, the returned image cannot be just the union of the transformed image patches.

$$O(x, y) \neq \bigcup_{i=1}^{p} E_i(P_i(x, y))$$

Hence, we have to remove the edges between the patches without destroying significant edges within the image. Furthermore, we strengthen the contrast between equally colored objects and manipulate the contrast, where it is too strong.



We tested the algorithm on about 20,000 images. The performance of the algorithm is in the same range as the image scanning, it takes about 3-5 minutes. The radiometric resolution of the input and the output image may be chosen to be 8 or 16 bits.

We designed the program start in a way that each user may set the parameters for the patch

size. Thus, we are able to demonstrate the performance of the dodging approach with different choices for the patch size. If it is chosen as big as the input image's size, the dodging is done globally. Alternatively, one may select patches which completely cover only a small number of image rows or columns, respectively. As seen in fig. 7, both tests lead to unsatisfying results since the contrast is quiet low in smaller image parts, e.g. around the bomb impacts. If the patch size is set too small, then some structures in the image are also only badly interpretable as demonstrated in fig. 7 when we show the result with 300 times 300 patches. In this case the noise
is strenghened too much. The patch size for the best results takes the size of the histogram and the characteristics of the imaging process into account.

### 5 Summary and Outlook

In this article we have presented a project of the explosives disposal services of NRW for scanning and enhancing allied aerial images of the WWII. The resulting, dodged images have the quality that is necessary for image interpretation aimed at finding bombed areas and blinders. The tested software has the envisaged speed.

Meanwhile 20,000 images have been processed successfully. The production line of the dodging will be installed in short time. The digitization project will go on. Several tasks have to be realised for allied images during the next years, e.g. the automatic georeferencing of the scanned images, the automatic model building of flight stripes and the automatic interpretation of aerial images for bomb craters and blinders.



Figure 7. Effects of patch size for dodging results. First row left, only one patch has been used (global approach); right, row-wise dodging. Second row left, small patches with 300 x 300 pixels; right, bigger patches with 4000 x 4000 pixels.

#### Acknowledgements:

We thank the surveying office of NRW which does the scanning as a part of a contract with the Ministry of the Interior of North Rhine-Westphalia, department 75 and which performed the first tests of different commercially available dodging algorithms. We also thank TARA for supporting this publication by its images.

#### 6 Literature

- BABINGTON SMITH, C., 2004: Evidence in Camera: The Story of Photographic Intelligence in the Second World War. Sutton Publishing.
- CARLS, H.-G. & MÜLLER, W., 2007: Die Aktualität der Vergangenheit der Kriegluftbestand "JARIC" in der modernen Kampfmittelbeseitigung. PFG 2/2007: 121-129.
- LUA NRW, 2006: Digitale Kriegsluftbilder NRW: Hinweise zur Nutzung bei der
- Altlastenerfassung. Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz MALBO 22. STANLEY, R. M., 1981: World War II Photo Intelligence. Scribner.

# Die DPP-Methode: ein einfacher empirischer Ansatz zur Korrektur atmosphärischer Effekte in HRSC-AX Scannerdaten

#### TILMAN BUCHER<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Die HRSC-AX (High Resolution Stereo Camera - Airborne eXtended) ist ein multispektraler Mehrzeilen Stereo-Scanner, der am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Berlin entwickelt wurde und im Rahmen der Erdfernerkundung betrieben wird. Die HRSC-AX ist eine Weiterentwicklung der HRSC, welche im Rahmen der MARS EXPRESS Mission der ESA den Mars aufnimmt.

Aufgrund der Wellenlängenabhängigkeit atmosphärischer Streuprozesse sind die Bilddaten kurzwelliger Kanäle von diesen am stärksten betroffen, aufgrund ihrer Richtungsabhängigkeit ist ihr Einfluss innerhalb eines Bildstreifens nicht konstant. Das Aufnahmeprinzip des Pushbroom-Scanners erlaubt die vereinfachte Annahme, dass alle Pixel einer Bildspalte unter annährend derselben Beleuchtungs- und Beobachtungsgeometrie aufgenommen wurden und denselben Atmosphäreneinfluss aufweisen. Dies wird im Rahmen der DPP-Methode ("Dark-Pixel-Profile" bzw. "Dunkel-Pixel-Profil") – basierend auf der Dark-Pixel-Methode (z.B. CHAVEZ, 1988) – genutzt, indem für jeden Flugstreifen jedes Kanals blickwinkelabhängige Statistiken und Histogramme berechnet werden. Lokale Variationen der Atmosphäreneffekte (z.B. durch Topographie, Nachbarschaftseffekte) können nicht erfasst werden. Der statistische Ansatz beruht auf der Annahme, dass aufgrund langer Bildstreifen, hoher geometrischer Auflösung (reine Schattenpixel) und weiter Verbreitung eines homogenen Objekts mit niedrigem Reflektionsgrad in jeder Bildspalte Pixel mit sehr geringem Bodensignal vorhanden sind. Dies ist ein in den Kanälen blau, grün und rot bei schattiger Vegetation (Wald) meist gegeben. Durch eine Minimums-Operation wird aus spaltenweisen Histogrammen ein Profil der dunkelsten Pixel erzeugt (DPP) und geglättet. Dieses Profil, dessen Form charakteristisch ist für die jeweiligen Beobachtungs- und Atmosphärenbedingungen, wird als Offset zur Korrektur verwendet.

Die DPP-Methode wurde in der Prozessierung großer Datensätze in Mitteleuropa angewandt. Im Vergleich zur Prozessierung unkorrigierter Datensätze weisen sie eine visuell gleichwertige oder bessere Qualität (Homogenität, Kontrast) auf. Die Vorteile der DPP-Methode im Vergleich zu anderen Atmosphärenkorrekturmethoden sind ihre Einfachheit und Robustheit, die Anwendbarkeit auf radiometrisch nicht absolut kalibrierte Daten und auf geometrisch unkorrigierte Daten (keine Co-Registrierung nötig), sowie die Schnelligkeit in der Prozessierung sehr großer Datenmengen.:

# 1 Einleitung

Im Rahmen der letzten Jahre finden digitale Sensoren zunehmende Verbreitung im Bereich der Luftbildaufnahme. Eine ganze Reihe neuer Sensoren wurde entwickelt, die grob in 2 Kategorien unterteilt werden können, ohne hier im Detail auf die einzelnen Systeme einzugehen:

1) Matrixbasierte Flächensensoren, die analog zum klassischen Luftbild flächenhafte Einzelbilder einer festen Größe aufnehmen. Hierbei können Einzelbilder mehrerer

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Tilman Bucher, DLR, Rutherfordstraße 2, D-12489 Berlin. tilman.bucher@dlr.de

Sensoren zu einem großen Luftbild zusammengesetzt sein. Diese werden anschließend ähnlich wie ein klassisches Luftbild weiterverarbeitet. Als Beispiele hierzu seien die Digital Mapping Camera (DMC) der Firma INTERGRAPH sowie die UltraCam (VEXCEL IMAGING AUSTRIA) genannt.

2) CCD-Zeilensensoren, die einzelne Bildzeilen aufnehmen; durch Aneinanderreihung der einzelnen Bildzeilen entstehen beliebig lange Bildstreifen. Als Beispiele hierzu seien die HRSC-AX und die MFC (DLR), die JAS (JENA OPTRONIK) sowie die ADS40 (LEICA GEOSYSTEMS) genannt. Die hier beschriebene DPP-Methode eignet sich nur für diese Art von Zeilensensoren.

Primäres Ziel einer Befliegung ist es, visuell und radiometrisch homogene und korrekte Bilddaten der Oberfläche für ein Projektgebiet zu gewinnen. Aus diesen können unter bestimmten Umständen absolute physikalische Parameter der Oberfläche bestimmt werden, die Vergleiche mit anderen Daten ermöglichen (andere Sensoren, andere Aufnahmezeitpunkte, Vergleichsmaterial aus Datenbanken).

Um homogene Bilddaten zu erhalten, müssen neben Instrumenteneffekten auch andere äußere Einflussfaktoren berücksichtigt werden, die sich im Laufe einer Befliegung verändern. Zu diesen zählen neben der Atmosphäre auch die Strahlungsintensität, die Beobachtungsgeometrie und die Topographie.

Im Folgenden wird dargestellt, wie mit einfachen empirischen Mitteln eine deutliche Reduzierung von Atmosphäreneffekten in Multispektraldaten eines Zeilenscanners erreicht werden kann.

# 2 Problemstellung

Die HRSC-AX ist ein Mehrzeilenscanner mit 5 panchromatischen Stereokanälen und 4 Multispektralkanälen (NEUKUM & LEHMANN, 1997). Jeweils 2 Multispektral- und 2 Stereokanäle sind symmetrisch zum Nadirkanal unter verschiedenen Blickwinkeln ("along track") angeordnet, ein Objekt am Boden wird von jedem Kanal aus einem unterschiedlichen Blickwinkel zu einem unterschiedlichen Zeitpunkt aufgenommen. Die einzelnen Bildstreifen der unterschiedlichen Kanäle sind aus diesem Grund vor der geometrischen Korrektur nicht co-registriert. Der Öffnungswinkel der HRSC-AX ("across track") beträgt  $\pm 14,5^{\circ}$ . Vor allem in den Kanälen blau, grün und rot der HRSC-AX lassen sich Atmosphäreneffekte beobachten, die systematisch mit dem Blickwinkel variieren und sich negativ auf die weitere Prozessierung und die Bildqualität auswirken.

Eine Reduktion der Atmosphäreneffekte erfolgt im Rahmen einer Atmosphärenkorrektur. Es gibt eine Vielzahl von Methoden zur Atmosphärenkorrektur; diese werden in der Literatur nach unterschiedlichen Kriterien unterteilt, so z.B. in SCHLÄPFER (1998). Ziel ist es, die Oberfläche so darzustellen, wie sie ohne eine Atmosphäre aussehen würde.

Aufgrund der fehlenden Co-Registrierung ist eine spektrale Analyse bzw. eine Klassifikation der HRSC-AX Daten vor einer aufwändigen geometrischen Korrektur dieser Daten nicht möglich. Weiterhin ist die HRSC-AX nur relativ kalibriert. Somit sind 2 Grundvoraussetzungen einer

parametrischen Atmosphärenkorrektur, wie sie z.B. ATCOR4 (RICHTER & SCHLÄPFER, 2002) darstellt, nicht gegeben.

Die DPP-Methode (Dark-Pixel-Profile bzw. Dunkel-Pixel-Profil) ist ein einfacher und robuster empirischer Ansatz, um den Einfluss der Atmosphäre in den Bilddaten von CCD-Zeilensensoren zu reduzieren und die Bildqualität zu verbessern. Dies wird im Folgenden an Beispielen der HRSC-AX dargestellt.



Abbildung 1: Wannenförmige dpp-Profile, blauer Kanal, Befliegung Tegernsee. Die Profile bilden 2 Gruppen; die Einteilung in 2 Gruppen korreliert mit der alternierenden Flugrichtung (ungerade Profile W-O, gerade O-W). Der Anstieg in allen Profilen von Pixel 5700 bis 6000 ist technisch bedingt.

## 3 Methodik und Beispiele

Der Einfluss der Atmosphäre auf die Bilddaten einer Befliegung ist spektral, zeitlich und räumlich variabel. Die Bestimmung der Atmosphäreneffekte erfolgt in radiometrisch relativ kalibrierten, geometrisch unkorrigierten Bilddaten, für jeden Kanal separat. Im Falle der HRSC-AX erfolgt eine Korrektur nur für die Kanäle Rot, Grün und Blau, wobei die atmosphärische Streuung mit zunehmender Wellenlänge abnimmt. Im infraroten Kanal und den panchromatischen Kanälen ist der Atmosphäreneinfluss im Verhältnis zum Signal gering und mit Hilfe der DPP-Methode nicht bestimmbar. Einflüsse der Topgraphie und des Untergrundes (z.B. klare Gipfellagen und diesige Tallagen, Nachbarschaftseffekte) können nicht erfasst werden. Innerhalb eines Bildstreifens wird eine homogene Atmosphäre angenommen. Unter diesen Annahmen



Abbildung 2: Deutliches Streifenmuster durch blickwinkelabhängige Atmosphärenstreuung, überwiegend im blauen Kanal, Befliegung Tegernsee, Kanäle RGB. Die Flugrichtung alterniert mit jedem Streifen (ungerade W-O, gerade O-W), die geometrisch korrigierten Daten wurden von N nach S hart übereinander kopiert, keine Histogrammanpassung.



Abbildung 3: Reduziertes Streifenmuster nach der dpp-Korrektur. Die verbleibende Streifung kann durch eine gleitende Mosaikierung und Histogrammanpassung noch deutlich reduziert werden.

variiert der Einfluss der Atmosphäre auf die Bilddaten nur noch von Bildstreifen zu Bildstreifen und innerhalb eines Streifens abhängig von der Aufnahmegeometrie. Da sich der Sonnenstand innerhalb eines Flugstreifens (in der Regel ca. 10 Minuten) nicht nennenswert ändert, hat jede Bildspalte eine annährend konstante Aufnahmegeometrie bzw. Phasenwinkel. Dieser ändert sich systematisch mit dem Blickwinkel über die CCD-Zeile hinweg.

Unter der Annahme, dass sich in jeder Spalte eines Bildstreifens von typischerweise mehreren 10000 bis 100000 Bildzeilen ein beschattetes Objekt mit sehr niedrigem Reflektionsgrad und praktisch ohne direkt reflektiertes Signal befindet (typischerweise Nadelwald), wird über spaltenweise Histogramme und eine Minimumsoperation ein DPP-Profil (BUCHER, 2004) der dunkelsten Pixel für jede Bildspalte erstellt. Das Signal, das in diesem Profil gemessen wird, wird als durch die atmosphärische Streuung verursacht angesehen. Dieses Signal variiert mit dem Phasenwinkel und hat typischerweise eine Wannenform (vgl. Abb.1). Die Wannenform ist unter normalen Befliegungsbedingungen in Mitteleuropa im blauen Kanal am stärksten ausgeprägt, sie nimmt mit zunehmender Wellenlänge meist ab, und nähert sich einer linearen Kurve (roter Kanal) an.

Mit der DPP-Methode lassen sich neben dem additiven Anteil der Atmosphärenstreuung auch systematische Instrumenteneffekte bestimmen und korrigieren, in diesem Fall ein additives Signal in der an der Ausleseelektronik zugewandten CCD-Seite (ca. Pixel 11400-12000, hier 5700-6000 bei 2x2 Binning). Nach Korrektur dieses Instrumenteneffekts werden die Profile mit einem Polynom 2. Grades geglättet, dieses wird dann zur Korrektur der Atmosphäreneffekte genutzt. Ein Vergleich zweier Mosaike mit und ohne Korrektur findet sich in Abb. 2 und Abb. 3.



Abbildung 4: RGB Bildmosaik HRSC-AX, Sonthofen. Unten: Systematische Helligkeitszunahme von S nach N durch Fortpflanzung von Atmosphäreneffekten aus den Einzelstreifen im Rahmen einer iterativen Histogrammanpassung während der Mosaikierung. Oben:Homogene Helligkeitsverteilung mit DPPkorrigierten Streifen.



Abbildung 5: Mean-Profil, blauer Kanal, Sonthofen (vgl. Abb. 4). Die systematische Helligkeitszunahme von S nach N ist im Mosaik der korrigierten Daten wesentlich geringer. Die verbleibende Zunahme korreliert mit einer Abnahme des sehr dunklen Waldanteils.

Neben der Reduzierung der Streifung bewirkt die Korrektur der Randaufhellung in den Einzelstreifen eine verbesserte iterative Histogrammanpassung und dadurch eine deutliche Reduzierung eines Helligkeitsverlaufs (Graukeils) innerhalb der Bildmosaike. Dies wird deutlich an dem Beispiel Sonthofen (siehe Abb. 4), welches aufgrund klarer Atmosphärenbedingungen und einer gleitenden Mosaikierung, die nur die inneren Teile eines Flugstreifens nutzt, praktisch keine Streifenmuster aufweist. Während das unkorrigierte Mosaik einen deutlichen Helligkeitsverlauf von S (dunkel) nach N (hell) aufweist, ist im Mosaik der DPP-korrigierten Daten (oben) auch bei starkem Stretch kein Verlauf sichtbar. Die Verbesserung ist auch in einem N-S verlaufenden Mean-Profil des blauen Kanals klar zu erkennen (Abb. 5).

# 4 Voraussetzungen und Einschränkungen

Angesichts des statistischen Ansatzes sind gewisse Voraussetzungen nötig, um die DPP-Methode sinnvoll einsetzen zu können:

Es sollte mit einer hohen Wahrscheinlichkeit überall im Sichtfeld, d.h. in jeder Bildspalte des Sensors, ein dunkles Objekt im jeweiligen Spektralkanal erfasst werden. Aus diesem Grund sollte eine gewisse Länge der Flugstreifen gegeben sein. Schwierigkeiten bereiten z.B. parallel zu Küstenlinien geflogene Bildstreifen, da dort die Statistiken nicht über den gesamten Bildstreifen repräsentativ sind.

In der Regel werden im Rahmen einer Befliegung mehrere Streifen parallel geflogen. Weicht das DPP-Profil eines Bildstreifens aufgrund eines "schlechten" Dunkelpixelverteilung stark von den benachbarten Streifen ab, so ist eine visuelle Prüfung der Daten notwendig. Das entspreche DPP-Korrekturprofil kann aus benachbarten "guten" Profilen derselben Flugrichtung interpoliert werden, oder nur Teile des Profils können selektiv genutzt zur werden.

In den bisherigen prozessierten Daten, die hauptsächlich in Mitteleuropa aufgenommen wurden, besteht der überwiegende Teil der dunklen Objekte aus dunkler Vegetation. Vegetationsfreie Gebiete eignen sich nur eingeschränkt, sie haben jedoch aufgrund ihres tendenziell höheren Reflektionsgrades auch ein besseres Signal-Rausch Verhältnis.

Auch überwiegend städtische Bereiche (z.B. Berlin, Potsdam) konnten erfolgreich mit der DPP-Methode verbessert werden.

In Bereichen mit starkem Relief und stark unterschiedlicher Atmosphärenstreuung innerhalb eines Flugstreifens (klare Gipfel neben diesigen Tälern) kann die DPP-Methode nur eine Minimalabschätzung der Effekte geben. Die Erfahrung hat gezeigt, dass eine Korrektur auch in solchen Gebieten sinnvoll ist, jedoch nur mit interaktiver Kontrolle durchgeführt werden sollte.

# 5 Zusammenfassung und Ausblick

In einer Vielzahl von Befliegungen in Mitteleuropa hat es sich gezeigt, dass eine deutliche Reduzierung von Atmosphäreneffekten und Instrumenteffekten in den Bilddaten der HRSC-AX möglich ist. Die Korrektur nutzt die geometrisch unkorrigierten, nicht co-registrierten und nur relativ kalibrierten Bilddaten für die Berechnung der DPP-Profile. Auch die Korrektur an sich erfolgt in den geometrisch unkorrigierten Daten, was die Menge der Daten reduziert und gut in den Prozessierungsablauf passt. Die Korrektur erfolgt "halbautomatisch" anhand der Statistiken, nur selten müssen die Bilddaten interaktiv in die Korrektur einbezogen werden.

In den bisher prozessierten Daten konnte die DPP-Korrektur in ca. 90% der Fälle sinnvoll angewandt werden. In einem Vergleich der Mosaike von ca. 20 Befliegungen führten die Korrekturen zu einem visuell zumindest gleichwertigen, meist jedoch zu einem besseren Ergebnis. Die DPP-Profile haben sich vor allem in Zielgebieten mit einem gewissen Waldanteil als zuverlässig erwiesen, da dunkle Vegetation – zumindest in den bisher prozessierten Daten – einen hohen Anteil der detektierten "dunklen Objekte" darstellt.

Die DPP-Methode eignet sich für CCD-Zeilensensoren ("Pushbroom-Scanner"). Sie kommt insbesondere dann zum tragen, wenn der Blickwinkel der Sensoren quer zur Flugrichtung groß ist (ca. >  $10^{\circ}$ , z.B. HRSC-AX ±  $14,5^{\circ}$ ).

Der nächste Schritt, nach der bisher überwiegend qualitativen Betrachtung der DPP-Methode ist eine quantitativere Auswertung absolut kalibrierter Daten. Eine Bestimmung einer optischen Dichte aus den DPP-Profilen ist angestrebt. Ähnliche Methoden (Schattenmethode bzw. Stereomethode) zur Bestimmung der optischen Dichte der Marsatmosphäre anhand der HRSC Daten auf MARS EXPRESS sind schon im Einsatz (HOEKZEMA et al, 2001).

# 6 Literaturverzeichnis

BUCHER, T., 2004: A simple atmospheric correction for HRSC-AX high resolution image data – examples and conclusions from HRSC flight campaigns. Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology IV. Edited by Ehlers, Manfred; Posa, Francesco; Kaufmann, Hermann J.; Michel, Ulrich; De Carolis, Giacomo. Proceedings of the SPIE, 5574: 244-251.

- CHAVEZ, P.S., 1988: An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. Remote Sensing of Environment, **24**: 459-479.
- HOEKZEMA, N. M.; MARKIEWICZ, W. J. & KELLER, H. U., 2001: Methods to Estimate Optical Depth of the Martian Atmosphere from Orbiter Images. Bulletin of the American Astronomical Society, 33: 1098.
- NEUKUM, G. & LEHMANN, F., 1997: HRSC-A: Eine hoch auflösende, multispektrale CCD-Stereo-Kamera, DGPF-Tagungsband, Frankfurt: 203-209.
- RICHTER, R. & SCHLÄPFER, D., 2002.: Geo-atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data. Part 2: atmospheric/topographic correction. Int. J. Remote Sensing, 23: 2631-2649.
- SCHLÄPFER D., 1998: Differential Absorption Methodology for Imaging Spectroscopy of Atmospheric Water Vapor. Dissertation, Remote Sensing Series, 32, RSL, Department of Geography, University of Zürich: pp. 131.

# Integration von mobilen Geosensoren in kollaborative virtuelle Globen

#### STEPHAN NEBIKER, MARTIN CHRISTEN, HANNES EUGSTER, KEVIN FLÜCKIGER, CHRISTIAN STIERLI<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Dieser Beitrag beschreibt Möglichkeiten und Anforderungen, welche sich aus einer Integration mobiler Geosensoren (z.B. Videosensoren auf Mikrodrohnen) in kollaborative 3D-Geoinformationsumgebungen ergeben. Er identifiziert wichtige Designaspekte, die bei der Realisierung eines derartigen Geo-Kollaborationsframeworks berücksichtigt werden müssen und beschreibt Kernpunkte der Architektur eines Prototypsystems, das als Bestandteil des Forschungsprojekts ViMo (Virtual Monitoring) entwickelt wird.

# 1 Einleitung

#### 1.1 Status und Motivation

*Virtuelle Globen* – Bei der Entwicklung heutiger virtueller Globen wie Google Earth oder NASA World Wind standen weder dynamische noch Echtzeit-Inhalte, wie viele bewegliche Objekte oder mobile Geosensoren, im Vordergrund noch wurden sie als räumliche Kollaborationsumgebungen konzipiert. Die Unterstützung mobiler Geosensoren und kollaborativer Funktionalität in hochaufgelösten virtuellen G loben eröffnet jedoch ein ganzes Spektrum an neuen Anwendungsbereichen, wie Sicherheit, Verkehrsüberwachung, Feuerüberwachung und -bekämpfung oder Grenzüberwachung.

*Geo Sensor Web* – Schon heute existiert eine Viel zahl von georeferenzierten Sensoren, welche Informationen über die unterschiedlichsten Phänomene wie Wetter, Pegelstände oder Verkehrsaufkommen überwachen. D iese Sensoren wurden aber bisher in aller Regel über proprietäre Schnittstellen, Kommunikationskanäle und Protoko lle angesprochen. A ll dies behinderte eine breite Nutzung solcher Geosensordaten. Demgegenüber steht eine Reihe von jüngeren Entwicklungen, welche diese Situation nachhaltig verbessern und damit G eosensoren zu einer zentralen Informationsquelle ma chen dürften – insbesondere in Kombination mit virtuellen Globen. Zu diesen Entwicklung en gehören: einerseits die Etablierung standardsierter Internet-Protokolle sowohl für drahtbasierte als auch drahtlose Kommunikationskanäle, andererseits Dienst basierte Archit ekturen und Standards insbesondere im Bereich Geo Sensor Web. Von besonderem Interesse ist dabei die OGC Sensor Web Enablement (SWE) Initiative des Open Geospatial Consortiums (BOTTs et al., 2006).

Mikrodrohnen als neue Geosensorplattform – Für die Realisierung zukünftiger Monitoringund Kollaborationsanwendungen in virtuellen Gl oben sind neben den oben aufgeführten Standards zur Kommunikation mit Geosensoren, die Entwicklung neuer Geosensoren und -plattformen ebenso wichtig. Fortschritte in der Miniaturisier ung von Komponenten zur Positions- und Orientierungsbestimmung sowi e bei Leichtbau-Materialen und bei den Batteriekapazitäten haben zur Entwicklung ei ner neuen Generation leichtgewichtiger, autonom einsetzbarer fliegender Sensorplattf ormen geführt. Abb. 2 zeigt das System 'microdrones md4-200', eine der ersten operati onellen Mikrodrohnen, welche spezifisch für lokale Monitoringaufgaben entwickelt w urde. Die Mikrodrohne md4-200 wird von vier

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Stephan Nebiker, Martin Christen, Hannes Eugster, Kevin Flückiger, Christian Stierli: (stephan.nebiker, martin.christen, hannes.eugster, kevin.flueckiger, christian.stierli)@fhnw.ch, Institut Vermessung und Geoinformation, Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik, FHNW Fachhochschule Nordwestschweiz, CH-4132 Muttenz

Elektromotoren angetrieben, kann wie ein Helikopter betrie ben werden und erlaubt eine Flugzeit von jew eils ca. 20 Minuten. D as integrierte Fluglageregelungssystem basiert auf GPS, Höhenmesser und Magnetsensoren und erlaubt sowohl einen interaktiven als auch einen vollständig autonomen Betrieb (ab Sommer 2007) . Das maximale Startgewicht beträgt ca. 900 g bei einer maximalen Nutzlast von ca. 2 50 g. Als Sensoren können RGB-, Video- oder auch miniaturisierte Thermalkameras eingesetzt werden. Auf Grund ihres geringen Gewichts und ihres kaum wahrnehmbaren Geräuschpegels kann diese neue Generation von Geosensorplattformen auch im überbauten und bewohnten Gebiet sicher eingesetzt werden. Bei der heutigen Generation von derartigen Mikrodrohnen können starker Wind und Windböen einen Einsatz erschweren oder sogar verunmöglichen.





Abb. 1: OGC Geo Sensor Web (BOTTS et al., 2006)

Abb. 2: Mikrodrohne mit Digitalkamera

## 1.2 Das ViMo-Forschungsprojekt

ViMo (Virtual Monitoring) ist ein anw endungsorientiertes Forschungsprojekt am Institut Vermessung und Geoinformation der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), welches 2006 gestartet wurde, um ein Softwareframework zu entwickeln, welches die Integration von verteilten, mobilen Bildsensordaten in interaktive 3D-Geoinformationsdienste erlaubt. Hauptziele des ViMo-Projekts sind:

- Design und Entwicklung der i3D -Technologie, einer neuen Generation eines virtuellen Globus mit speziellem Fokus auf Echtzeitinhalte und hohe geometrische Genauigkeit
- Design und Entwicklung eines Geo-Kollaborations-Frameworks als Erweiterung von i3D
- Untersuchungen zur Integration neuer m obiler Geosensorplattformen und Echtzeit-Geosensordaten in die i3D-Technologie

Zu den möglichen Einsatzgebieten der V iMo-Technologie gehören die autonome rasche Kartierung von K atastrophengebieten, Überwachungsaufgaben im Strassenverkehr, bei Waldbränden oder bei Grossanlässen. Dabei ist die Integration von Drohnen basierten Bilddaten in einen virtuellen Globus wie i3D besonders viel versprechend (EUGSTER & NEBIKER, 2007). Begleitend zum ViMo-Projekt werden Fragestellungen zur Modellierung und Visualisierung abstrakter – oft auch dynamischer – Inhalte in intera ktiven 3D-Geovisualisierungen (BLEISCH et al., 2006).

Im vorliegenden Beitrag werden zwei wichtige Aspekte diskutiert, die bei der Integration präziser mobiler Geosensordaten in virtuelle Globen zu lösen sind: einerseits geeignete geodätische Bezugssysteme a ndererseits geeignete neue Inhaltstypen und Inhaltskanäle. Deren Umsetzung wird anschliessend anhand einer kurzen Vorstellung der ViMo-Architektur und von ersten Resultaten illustriert und diskutiert.

# 2 Geodätische Referenzmodelle

Sobald virtuelle Globen für die Ü berwachung, die Positionsbestimmung oder sogar das Tracking von Objekten aus der Realwelt eingesetz t werden sollen, werden die geometrische Genauigkeit und Zuverlässigkeit zu wichtigen Faktoren. Um da s Genauigkeitspotential moderner Geosensoren im (Sub-) Meterbereich ausnützen zu können, müssen virtuelle Globen auf geodätischen Referenzmodellen mit einer vergleichbaren Genauigkeit beruhen. Nachfolgend werden die verschiedenen Modelle sowie deren Stärken und Schwächen vorgestellt.

#### 2.1 Lokale kartesische Koordinatensysteme ("Flat Earth"- Modelle)

3D-Computergrafik basiert traditionell auf kartesischen Koordinatensystemen und auf Koordinatendomänen von 32 Bits. Diese Basis is t völlig ausreichend für den Grossteil an Visualisierungsaufgaben, welche keine absolute Georeferenzierung erfordern. Es ist denn auch wenig erstaunlich, dass bis heute ein Grossteil von 3D-Geovisualisierungslösungen auf dem "Flat Earth"-Modell beruht. D ieses Modell funktioniert einwandfrei für die Visualisierung von lokalen Geo-Szenen be i welchen alle Daten auf demselben Koordinatensystem beruhen. Ernsthafte Problem e ergeben sich z.B. in der Flugsimulation, wenn solche Szenen auf ganze Länder ode r Kontinente ausgedehnt werden und wenn Positions- und vor allem Ri chtungsinformationen von Geos ensoren bzw. Flugobjekten integriert werden sollen (NEBIKER et al., 2007).



Abb. 3: Geodätische Referenzmodelle für virtuelle Globen.

#### 2.2 Sphärische und Ellipsoidische Referenzmodelle für virtuelle Globen

Als digitale Gegenstücke zu physikalischen Globen müssen virtuelle Globen genähert sphärische Himmelskörper wie die Erde, den Mond oder de n Mars abbilden können. Im Unterschied zu den physikalischen V ersionen müssen digitale Globen diese H immelskörper mit ihren Ausdehnungen von mehreren Tausend Kilometern auch grossmassstäblich und sehr detailliert repräsentieren können, was hohe Anforderungen an die Rechenschärfe ergibt (NEBIKER et al., 2007). Virtuelle Globen der Erde basieren in a ller Regel auf dem erdfesten, geozentrischen kartesischen Koordinatensyste m WGS-84, unterstützen jedoch auch eine Reihe lokaler Bezugssysteme (vgl. Abb. 3).

Als geometrische Referenzmodelle für virtuelle Globen bieten sich entweder eine Kugel oder ein Rotationsellipsoid an (Abb. 3). Ein sphärisches Modell ist weniger komplex und reicht für kleinmassstäbliche, regionale bis globale An wendungen aus. Die Abpl attung der Erde, als Folge der Erdrotation, in der G rössenordnung von 1/300 führt dazu, dass der Radius am Äquator ca. 21.4 km grösser ist als am Pol. Dies wiederum führt zu dreidimensionalen Positionsfehlern im Bereich von 10-20 km. Auch wenn dieser Fehler primär die Höhe betrifft und mit einer Senkrechtprojektion auf die K ugel zu einem grössen Teil kompensiert werden kann, so verbleibt doch ein Lagefehler in der Grössenordnung von bis zu 40 Metern, welcher beispielsweise mit einer nachträglichen loka len Transformation kompensiert werden muss. Somit muss ein e Ilipsoidisches Referenzmodell verwendet werden, falls die direkte Georeferenzierung besser als 10-40 Meter sein soll. Dies ist bei fast allen mittel- bis grossmassstäblichen Anwendungen der Fall, in welchen GPS-Positionsdaten sowie mehrere Kartenprojektionen zum Einsatz kommen.

#### 2.3 Geoid-Modelle für Monitoring- und Kollaborations-Aufgaben

Die Verwendung des Ellipsoids als geomet risches Referenzmodell ermöglicht hohe horizontale Genauigkeiten im Dezimeterberei ch. Bei der Höhengenauigkeit s tellt sich das Problem, dass die vertikale Bezugsfläche de r bestehenden Höhensysteme durch das Schwerefeld definiert wird, w elches auf Grund der unterschied lichen Massenverteilung im Erdinneren Schwankungen aufweist. Als vertikale Bezugsfläche dient das Geoid (vgl. Abb. 3), eine physikalisch definier te Referenzfläche, welche durch das Schwerefeld der Erde definiert wird und dem mittleren Niveau der O zeane entspricht. Das Geoid w eicht in der Höhe um bis zu  $\pm$  100 Meter von einem optimal eingepassten globalen Referenzellipsoid ab, wie zum Beispiel WGS-84.

Wenn nun in virtuellen Globen, wie dies üblicherweise der Fall ist, die orthometrischen bzw. geoidischen Höhen aus gebräuchlichen global en oder lokalen digita len Geländemodellen (DGM) direkt integriert werden, wird dadurch ein Höhenfehler von  $\pm$  100 Metern eingeführt. Dieser Effekt wird jedoch erst erkennbar, wenn 3D-Positionsdaten, welche mittels GNSS (Global Navigation Satellite System) bestimmt wurden, ebenfalls in die virtuelle Welt integriert werden. Der Grund dafür ist, da ss GNSS auf einem geomet rischen Bezugssystem basieren und grundsätzlich geomet rische Höhen liefern. N euere GNSS-Empfänger enthalten zwar oft ein (genähertes) globales G eoidmodell und können auch orthometrische Höhen liefern. Zur G ewährleistung einer guten drei dimensionalen Genauigkeit können virtuelle Globen einen der folgenden Ansätze verfolgen:

- Visualisierung basiert auf geometrischen Höhen In diesem Fall basiert die gesamte Visualisierung streng auf geometrischen Höhen. Dazu müssen sämtliche Höhendaten vor der Darstellung mit Hilfe eines integrierten globalen Geoidmodells korrigiert werden.
- Visualisierung basiert auf orthometrischen Höhen Dieser genäherte Fall beruht auf einer Kombination orthometrischer Höhen auf einer ellipsoidischen Bezugsfläche. Dabei müssen GNSS-basierte geometrische Se nsorpositionen um die G eoidundulationen korrigiert werden.

Auch wenn der zweite Ansatz aus mathematischer Sicht nicht streng ist, da er die Geoidundulationen bei der Darstellung der 3D-Szene vernachlässigt, hat er eine Reihe von Vorteilen: Ozeane können mit einer Höhe von 0 m gerendert werden und vor allem können mit diesem Ansatz präzisere regionale Geoidmodelle – sofern verfügbar – flexibel eingesetzt werden.

# 3 Raumbezogene Inhalte

#### 3.1 Kartographisches Basismodell

Das typische Basismodell eines virtuellen Globus basiert auf den folgenden Inhaltstypen:

- Digitale Geländemodelle (DGM) Der Grossteil and DGM-D aten in virtuellen G loben wird als Rasterdaten in regelmässigen Gitt ern integriert. Mit der raschen Zunahme an detaillierten lokalen Anwendungen wie Stad tplanung etc. wird der Bedarf nach der Unterstützung unregelmässiger DGM-Daten rasch steigen.
- Orthobilddaten und -karten Virtuelle G loben bestehen aus mindestens einem globalen Orthobild- oder Kartendatensatz mit beschränkter geometrischer Auflösung und beliebig vielen regionalen Datensätzen mit höherer Auflösung.

Diese Basisdaten zeichnen sich aus durch enorme Datenmengen in Terabytes-G rössenordnung. Daraus ergibt sich die zwingende Ford erung nach mehreren Auflösungsstufen, nach einer räumlichen Partitionierung sowie nach effizienten räumlichen Zugriffsstrukturen. Dazu müssen diese Basisdatensätze in der Regel in einem rechenintensiven Prozess vorprozessiert werden. In der Praxis kommen bei diesen Date nsätzen sehr oft erschwerende Faktoren w ie unterschiedliche Koordinatensysteme, unregelmässige Begr enzungen, Datenlöcher oder inseln sowie die Forderung nach fliessenden Übergängen hinzu.



Abb. 4: Prototyp eines 3D-Besucherinformationssystems für das Freilichtmuseum Ballenberg (CH) mit einem virtuellen Globus eingebettet in eine Webseite mit Multimediainhalten (© FHNW & Ballenberg)

#### 3.2 Heutige raumbezogene Inhaltstypen

Raumbezogene Inhaltstypen für 3D-Geoinformationsumgebungen w erden in diversen Publikationen jeweils aus unterschied lichen Perspektiven behandelt. In (HÄBERLING, 2003) findet sich eine systematische Zusammenstel lung typischer Objekttypen für 3D-K arten und interaktive 3D-Geovisualisierungen. In (NEBIKER et al., 2005) werden Obj ekttypen und Mechanismen zur anwendungsspezifischen Erweiterung des Basismodells vorgestellt. Zu den etablierten raumbezogenen Inhaltstypen für 3D-Geoinformationsdienste gehören:

- POI (Points of Interest) Dieser Inhaltstyp besteht aus einem Referenzpunkt, einem Text-Label oder einem Billboard mit wi ederum unterschiedlichen Text- oder Multimediainhalten. Beispiele umfassen Ortsnamen oder Positionsmarken für Objekte.
- 2D-Objekte Ein Objekttyp für zweidimensionale vektorbasierte Geodaten, w ie zum Beispiel Wanderwege, Leitungsnetze, Gefahrenzonen etc.

- 3D-Objekte Ein volumen- oder oberfläche nbasierter Objekttyp mit einer möglicherweise sehr komplexen Geometri e, mit thematischen sowie graphischen Eigenschaften wie photorealistischen Texturen. Beispiele umfassen 3D-Gebäudemodelle, Kunstbauten oder Strassenmöblierung.
- Multimediaobjekte Dieser Inhaltstyp wird in der Regel in Kombination mit einem der obigen Inhaltstypen, insbesondere mit POI, Multimediatypen unterstützt, die auch in verbreitet sind, wie Hypertext, Bilder, To virtuellen Globen entweder über einen in de n 3D-Viewer integrierten Browser oder über einen externen Browser unterstützt (vgl. Abb. 4).

#### 3.3 Neue Inhaltstypen

Aus der Bestrebung zur Erweiterung virtueller Globen in Richtung mobiler Geosensoren und Kollaboration ergeben sich neue Anforderungen an die zu unterstützenden Inhaltstypen. Zu diesen neuen Anforderungen gehören die Unterstützung für Echtzeit-Inhalte, für kinematische Objekte sowie für Objekttypen zur Repräsentation mehrdimensionaler und temporaler Informationen in einer 3D-Umgebung.



Abb. 5: Neuer Inhaltstyp 'Sensor': Mobile Geosensorplattform mit Video-Kamerakegel



Abb. 6: Thematischer kartographischer Inhalt integriert in interaktive 3D-Szene (BERTILLER & KELLER, 2005).

Beispiele neuer raumbezogener Inhaltstypen:

- Sensoren Mit diesem neuen Inhaltstyp sollen Geosensorplattformen, die Geosensoren selbst sowie deren Beobacht ungen mit den entsprechenden Eigenschaften unterstützt werden. Sensor-Objekte können statisch ode r kinematisch sein und Sensorplattformen können einen oder mehrere Sensoren mitführ en. In der 3D-Szene können Sensorobjekte als animierte 3D-Objekte mit ihrer aktuellen Position, Orientierung und beispielsweise ihrem Field of View (FOV) dargestellt werden (vgl. Abb. 5).
- Akteure (Actors) Dieser Inhaltstyp wird zur Repräsentation von Benutzern bzw. Teilnehmern in einer kollaborativen 3D -Umgebung benötigt. Die Modellierung von Actor-Objekten kann dabei stark an den Sensor-Objekttyp angelehnt werden. A ctor-Objekte weisen aber auch eine Reihe von spezifischen Eigenschaften auf, wie beispielsweise Benutzerberechtigungen und -rollen.
- Thematische kartographische Objekttypen Dieser neue Inhaltsty p soll eine effiziente Informationsvisualisierung in virtuellen Glob en ermöglichen, was vor allem in Verbindung mit Geosensordaten stark an Bedeutung gew innen wird. Thematische kartographische Objekte können als Spezialisierung generi scher graphischer Inhaltstypen, wie z.B. von 3D Balkendiagrammen oder 3D-Kartogrammen, betrachtet werden (vgl. Abb. 6).

 Georeferenzierte (Video-) Bilddaten – Dieser raumbezogene Inhaltstyp wird die Überlagerung von Bilddaten – insbesondere von Videodaten – mit de r virtuellen 3D-Szene in (nahezu) Echtzeit erlauben. D ieser Inhaltstyp birgt ein grosses Potential in verschiedenen Anwendungsbereichen, ist aber auch sehr anspruchsvoll in der Umsetzung. Erste Untersuchungen zur Integration von mob il erfassten, georeferenzierten Videodaten mit virtuellen Globen werden in (EUGSTER & NEBIKER, 2007) vorgestellt.

Mit der Erweiterung virtueller Globen in Ri chtung Echtzeitinhalte und Kollaboration gewinnen neben der oben aufgeführten Inhaltsmodellierung die Aspekte der Inhaltskanäle und der Inhaltsübermittlung stark an Bedeutung. Währen ddem heutige virtuelle Globen ihre statischen und gestreamten Inhalte pr imär mit dem Pull-Verfahren beziehen, erfordert insbesondere die Kollaboration auch die Unterstützu ng des Push-V erfahren bzw. der Objektsynchronisation. Diese Aspekte werden in (NEBIKER et al., 2007) ausführlicher behandelt.

# 4 Die ViMo-Architektur

## 4.1 Die i3D-Basistechnologie

Der i3D-Viewer ist eine 3D-Geovisualisierungs-Engine der dritten Generation, welche an der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) entwickelt wird. Der Viewer unterstützt sphärisches Rendering auf dem WGS-84-E llipsoid. Er ist hochgradig optimiert für die neue G eneration von GPUs (Graphic s Processing Units), benützt die O penGL Grafik-API und ist auf verschiedenen Plattformen lauffähig (Windows, MacOS X und Linux).

Das kartographische Basismodell kann vi ele Terabytes an O rthobild- und DGM-D aten enthalten. Diese Daten können über ein Netz geladen werden. Über weitere Inhaltskanäle können grosse Mengen and 3D-O bjekten (z.B. 3D-Stadtmodelle), POI und zukünftig auch effizientes Streaming dieser Massendaten zu werden. Bei dies em Prozess erfolgen die Tr ansformation lokaler Koordinaten in WGS-84 sowie deren Partitionierung und Indizierung. Das Anforder n der Partitionen auf dem gewünschten Level of D etail erfolgt auf der Fehlermetrik von (LINDSTROM et al., 1996), welche für s phärisches Rendering auf dem Ellipsoid modifiziert wurde.

#### 4.2 Das ViMo Geo-Kollaborations-Framework

Eine gute Übersicht sowie grundlegende Überlegungen zur Thematik der Geo-Kollaboration finden sich in (MACEACHREN, 2005). Zu den speziellen Anforderungen an das ViMo-Kollaborationsframework gehörten: ein Benutzerhandling mit einem flexiblen Berechtigungssystem, eine sichere und effiziente Kommunikation über das Internet zwischen einer grossen Anzahl Benutzern, die Möglichkeit zur gemeinsamen Nutzung eines virtuellen Globus sowie die Zurverfügungstellung zusätzlicher Kommunikationskanäle wie Chat, Video oder Voice. Auf Grund dieser Anforderungen wurde die RakNet Network Engine (RAKKARSOFT, 2007) als Basis für die Entwicklung des ViMo-Kollaborationsframeworks ausgewählt. RakNet ist eine Netzwerk-Bibliothek in C++ auf UDP-Basis aus der Online-Game-Entwicklung. Das ViMo-Kollaborationsframework – bestehend aus Client(s), Session Server und Connection Server – ermöglicht eine sichere Kommunikation zwischen sämtlichen Komponenten und Benutzern. Das Framework ermöglicht die automatische Übermittlung der raumbezogenen Inhalte an die Clients sowie die automatische Synchronisation gemeinsam genutzter Geoobjekte, wie Sensoren, in Echtzeit (NEBIKER et al., 2007).

# 5 Anwendungen und Resultate

Obwohl das ViMo-Projekt noch in vollem Gang ist, konnten viele der beschriebenen Konzepte zumindest als Prototypen umgesetzt und in Pilotprojekten gestestet werden. In der Folge werden mit "V irtual Monitoring" und "Augmented Monitoring" zwei typische zukünftige Anwendungsszenarien vorgestellt:

## 5.1 Virtual Monitoring

Eines der Hauptziele des ViMo-Projekts war es, di e Überwachung von realen Objekten und Prozessen in einer virtuellen Umgebung zu ermöglichen. Zu di esem Zweck wurden zwei Typen von Geo-Sensoren untersucht: ein GPS-Logger mit einer GSM-Datenübermittlung und ein georeferenzierter Videostream, welcher mit einer Minidrohne (Modellheli) mit GPS/INS-Positionierung aufgenommen wurde. U ntersuchungen zur Integration des mobilen V ideosensors anhand von Testflügen werden in (EUGSTER & NEBIKER, 2007) vorgestellt. A bb. 7 zeigt einen Frame aus dem luftgestützten Videostream (links) sowie eine Ansicht des eigenen virtuellen Globus i3D mit aktueller Position und Blickfeld des Geosensors.



Abb. 7: Virtual Monitoring: Drohnen basierter mobiler Videosensor integriert in virtuellen Globus



Abb. 8: Augmented Monitoring –georeferenzierter Videostream überlagert mit 3D-Objekten

## 5.2 Augmented Monitoring

Der zweite Anw endungsfall soll eine Überwachung von realen Objekten und Prozessen in einer Mixed Reality Umgebung ermöglichen. Anstelle einer Integration des Videostreams in die virtuelle 3D-Umgebung (vgl. Virtual Monitori ng) wird in diesem Fall eine Integration von 3D-Szeneninhalten in den georeferenzierten Videostream angestrebt. Im Vordergrund steht zurzeit die Überlagerung des Videostreams mit ausgewählten Inhaltstypen, wie z.B. 3D-Gebäudemodellen. Abb. 8. zeigt den A ugmented Videostream von einem Testflug i m Freiluftmuseum Ballenberg. In diesem Fall en thält das Video auch die GPS-Zeit zusammen mit der aktuellen Positions- und Orientierungsinformation der Sensorplattform.

# 6 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag zeig ten wir auf, welche V orteile aber auch welche neuen Anforderungen sich aus der Integration (mobiler) Geosensoren in zukünftige virtuelle G loben ergeben. Als zwei Hauptaspekte wurden einerseits geeigne te geodätische Referenzmodelle angesprochen, welche in virtuellen G loben die für lokale M onitoringaufgaben erforderlichen 3D-Genauigkeiten im Meterbereich gew ährleisten sollen. Andererseits wurd e eine Zusammenstellung raumbezogener Inhalte von virt uellen Globen präsentiert, angefangen vom kartographischen Basismodell bis hin zu neuen komplexen Inhalts typen, wie Sensoren oder georeferenzierte Videostreams. In der Folge wurde die ViMo-S ystemarchitektur vorgestellt, welche sich aus der neuen "Virtual Globe"-Basistechnologie i3D und einem 3D-Geo -Kollaborationsframework zusammensetzt. Die Umsetzung der zwei generischen Anwendungsszenarien "Virtual Monitoring" und "Augmented Monitoring" demo nstrieren die Leistungsfähigkeit und die Möglichkeiten einer Integration mobiler Geosensordaten mit virtuellen Globen.

Die laufenden Arbeiten konzentrieren si ch auf die Weiterentw icklung der i3D -Basistechnologie und des Kolla borationsframeworks. Im Fokus stehen dabei w eitere Untersuchungen und Entw icklungen im Umfeld des "A ugmented Monitoring"-Szenarios, speziell im Ber eich einer integr ierten Georeferenzierung georeferenzierter Videostreams, welche mit extrem leichtgewichtigen und kostengünstigen Mikrodrohnen erfasst werden.

## 7 Literaturverzeichnis

- BERTILLER, A. & KELLER, D., 2005. Baselland in Zahlen interaktiv und dreidimensional. Diploma Thesis, FHNW University of Applied Sciences Northwestern Switzerland, Muttenz.
- BLEISCH, S., DYKES, J. & NEBIKER, S., 2006. How are we to Represent Abstract Information in 'Realistic' 3D Environments?, GIScience, Münster (D).
- BOTTS, M., PERCIVALL, G., REED, C. & DAVIDSON, J., 2006. OGC® Sensor Web Enablement: Overview And High Level Architecture (OGC 06-050r2), OGC White Paper, Open Geospatial Consortium Inc.
- EUGSTER, H. & NEBIKER, S., 2007. Geo-Registration of Video Sequences Captured from Mini UAVs - Approaches and Accuracy Assessment, Mobile Mapping Technologies Symposium MMT 2007, Padua.
- HÄBERLING, C., 2003. Topografische 3D-Karten Thesen für kartografische Gestaltungsgrundsätze. ETH Nr. 15379. Dissertation Thesis, Institut für Kartographie, ETH Zürich.
- LINDSTROM, P. et al., 1996. Real-Time, Continuous Level of Detail Rendering of Height Fields. In: H. Rushmeier, T.-M. Rhyne and Association for Computing Machinery (United States) Special Interest Group on Graphics (Editors), SIGGRAPH 96 conference proceedings August 4-9, 1996. Association for Computing Machinery, New York, NY, pp. 109-118.
- MACEACHREN, A.M., 2005. Moving Geovisualization toward Support for Group Work. In: J. Dykes, A.M. MacEachren and M.-J. Kraak (Editors), Exploring Geovisualizations. Elsevier Science, Amsterdam, pp. 445-461.
- NEBIKER, S., CHRISTEN, M., EUGSTER, H., FLÜCKIGER, K. & STIERLI, C., 2007. Integrating Mobile Geo Sensors into Collaborative Virtual Globes - Design and Implementation Issues, Mobile Mapping Technologies Symposium MMT 2007, Padua.
- NEBIKER, S., SCHÜTZ, S. & WÜST, T., 2005. Geo-Roaming: Model-Driven Content Management for Web-based 3D Geoinformation Services, XXII International Cartographic Conference (ICC2005). The International Cartographic Association (ICA-ACI), La Coruna, Spain, 11-16 July 2005 (accepted paper).

RAKKARSOFT, 2007. Raknet - UDP game network library. URL: http://www.rakkarsoft.com/.

# Integration von Geodatensätzen in Google Earth: Erarbeitung eines unabhängigen Informationssystems

# ANDREAS WEHRLE<sup>1</sup> & GERHARD SCHROTTER<sup>2</sup>

Zusammenfassung: Die erarbeitete Applikation ermöglicht die freie Verwendung von Google Earth (GE) als Visualisierungs-Plattform für ein beliebiges Informationssystem. Das entworfene Personen-Informationssystem dient dabei als Prototyp, welcher die Anwendungs-Möglichkeiten aufzeigt.

Zur Erstellung des Informationssystems werden in der ersten Phase die bereits vorhandenen Geodaten (Luft-/ Satellitenbilder und 3D-Modelle) auf das mit GE kompatible Format automatisiert aufbereitet und in das entsprechende Referenzsystem umgewandelt. Somit können diese Daten in der zweiten Phase frei verwendet und mit externen Datensätzen kombiniert und in GE dargestellt werden. Die Einschränkung auf die in GE standardmässig integrierten Datensätze enfällt somit.

# 1 Einleitung

Mit der Veröffentlichung des virtuellen Globus Google Earth (GE) haben sich für die Visualisierung von Geodaten neue Weg geöffnet; die Daten können in ihrer richtigen Umgebung dargestellt werden, und sind so für den Menschen intuitiv verständlich (BECK et al. 2006).

Unabhängig von der Entwicklung von GE sind bereits grosse Mengen an Geodaten verfügbar. Dies sind sowohl Satelliten- und Luftbilddaten als auch 3D-Modelle. GE drängt sich dabei durch seine weite Verbreitung als Visualisierungs-Plattform auf. Dafür müssen die Geodaten jedoch zuerst auf die nötige Form aufbereitet werden: dazu gehört die Konvertierung in das entsprechende Format sowie die korrekte Georeferenzierung auf das von GE verwendete globale Koordinatensystem. Die Vorverarbeitung der Daten ermöglicht eine freie weitere Verwendung von GE als Visualisierungs-Instrument. Durch die Kombination von eigenen und externen Daten wird ein Informationssystem (BILL 1999) geschaffen, welches beliebig erweitert werden kann.



Abbildung 1: Aufbau Informationssystem

<sup>1</sup> awehrle@student.ethz.ch

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> gerhard.schrotter@geod.baug.ethz.ch

## 2 Datenaufbereitung

Die Grundlage des Informationssystems bilden die Geodaten, welche sich grob in Bilddaten (Luft- / Satellitenaufnahmen) und in 3D-Modelle unterteilen lassen. In ihrer vorliegenden Form sind sie meist nicht mit GE kompatibel, weshalb sie zuerst auf das entsprechende Format aufbereitet werden müssen.



Abbildung 2: Wirkungsweise Collada - KML

#### 2.1 Bilddaten

Werden qualitativ hochwertige Bilddaten verwendet, so zeigt sich dies in grossen Datenmengen. Um für die Datenübertragung ökonomische Leistungen zu erzielen, müssen die zu transferierenden Daten in ihrem Umfang reduziert werden. Eine Kompression der Daten kommt nicht in Frage, da sich dadurch die Bildqualität verschlechtert. Sinnvoll hingegen ist die Aufteilung der Bilddaten in kleine Stücke, welche auf verschledene Ebenen verteilt werden, sogenannte Bildpyramiden.



Abbildung 3: Bildpyramide

#### 2.1.1 Bildpyramiden

Bei Bildpyramiden wird das Ursprungsbild in Ebenen unterschiedlicher Auflösung aufgeteilt. Auf der obersten Ebene wird ein Bild mit der geringsten Auflösung visualisiert. Auf der nächst tiefer liegenden Ebene wird dasselbe Bild in 4 Bilder aufgeteilt, wobei jedes Teilbild dieselben Dimensionen besitzt wie das darüber liegende. Für diese Ebene ergibt sich dadurch eine höhere Auflösung. Auf der untersten Ebene wird wiederum die Ursprungsauflösung - aufgeteilt auf mehrere Bilder - erreicht. Bei einem entfernten Betrachtungsstandort wird die Ebene mit der

niedrigsten Auflösung angezeigt, bei sehr naher Betrachtung hingegen die höchst mögliche Auflösungsstufe.

Das entwickelte Verfahren teilt die georeferenzierten Ursprungsbilddaten automatisch in die Bildkacheln auf. Jede Bildkachel wird entsprechend ihrer Position mit einer KML-Datei referenziert. Damit der Ladevorgang der Ebenen für den Nutzer nicht wahrnehmbar ist, wird bei den Übergängen die Transparenz der Bilder durch den Algorithmus angepasst (PYTHON IMAGING LIBRARY HANDBOOK 2007).

#### 2.1.2 Georeferenzierung

Die auf das Schweizer Koordinatensystem abgestimmte Georeferenzierung der Ursprungs-Bilddaten muss auf das von GE verwendete Referenzsystem WGS84 umgerechnet werden. Die acht bekannten Parameter sind: X-und Y-Koordinate einer Bildecke im Schweizer Koordinatensystem, Bodenauflösung eines Pixels in X-und Y-Richtung (meist identisch), Drehwinkel der X-und Y-Bildachse, sowie die Bildbreite und -höhe in Pixeln. Aus diesen Parametern kann für jedes Teilbild der Bildpyramide die Koordinaten dessen Bildmittelpunktes berechnet werden. Somit wird jedes Teilbild korrekt im geforderten System georeferenziert. Die berechneten Daten werden in einer KML-Datei gelagert.

#### 2.1.3 KML

Das von XML abgeleitete Format KML (Keyhole Markup Language) dient in GE als Standardsprache für die Integration von Geodaten. Da es textbasiert ist, kann es dementsprechend sowohl von Mensch als auch Maschine gelesen werden. Hauptsächlich wird in KML die Position der Objekte auf der Erdoberfläche definiert. Es können keine graphisch komplexen Elemente in KML gespeichert werden, sondern lediglich die Primitive Punkt, Linie und Fläche. Durch so genannte Network Links kann in KML jedoch eine Referenz zu extern gelagerten Daten definiert werden, womit die Möglichkeit zur Integration von eigenen Geodaten besteht. Durch die unabhängige Datenlagerung besteht die Freiheit, die Daten zu Verändern und zu Aktualisieren, ohne das Gesamtsystem zu beeinträchtigen (KML 2.1 REFERENCE 2007).

#### 2.2 3D- Modelle

Als Austauschformat von 3D-Graphikdaten diente bis anhin meist VRML (Virtual Reality Modeling Language), weshalb viele 3D-Modelle in diesem Format vorliegen. Um die Modelle in GE zu integrieren, werden sie in das Format COLLADA konvertiert.

#### 2.2.1 COLLADA

COLLADA wurde ursprünglich von Sony im Zusammenhang mit der Entwicklung der Playstation 3 ins Leben gerufen. Es sollte als Austauschformat zwischen den verwendeten 3D-Animations- und Visualisierungsanwendungen dienen. Durch die Weitergabe des Formats an ein Open-Source-Konsortium konnte jedoch ein frei verfügbarer Standard geschaffen werden, was auch in der Namensgebung ersichtlich ist (COLLAborative Design Activity). COLLADA wird von den gängigen 3D-Modellierungs-Applikationen unterstützt (u.a. MAYA, BLENDER).

Das ebenfalls auf der XML-Syntax basierende Format speichert die Geometrie der Modelle, sowie eine Referenz zu separat gelagerten Texturdaten. In Zusammenspiel mit KML werden die 3D-Modelle so in ihrer realen Umgebung platziert.

#### 2.2.2 Koordinaten-Umwandlung

Die in einem lokalen kartesischen System definierten Modell-Koordinaten werden in das ellipsoidische WGS84-System transformiert (KAHLE 2004). Dazu wird vom Benutzer der Nullpunkt des lokalen Systems in GE definiert, worauf automatisch die Position der einzelnen Objekte in WGS84-Koordinaten berechnet wird. Mit Hilfe der folgenden Formeln kann der Wert von einem Meter des lokalen Koordinatensystems in den entsprechenden Wert in Dezimalgrad im globalen System umgerechnet werden (SWISSTOPO 2006):

$$dx = \frac{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi}}{a \cdot \cos \varphi} \qquad dy = \frac{\sqrt{\left(1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi\right)^3}}{a \cdot (1 - e^2)}$$

Gleichung 1: Umrechnung von 1m West (dx), resp. Nord (dy) in Dezimalgrad; Hergeleitet aus Kahle, 2004. Die verwendeten Parameter a (gr. Halbachse) und e<sup>2</sup> (erste numerische Exzentrizität im Quadrat) beziehen sich auf das in der Schweiz verwendete Bezugs-Ellipsoid WGS84.

# 3 Verwaltung der Daten

Die Verknüpfung der Daten erfolgt über das integrierte Verwaltungssystem. Mittels SQL-Abfrage werden die vom Benutzer erwünschten Daten aus der Datenbank ausgelesen und dynamisch in einer KML-Datei aufbereitet. Anschliessend erfolgt die Darstellung in Google Earth. Die Verbindung zwischen Verwaltungssystem und GE erfolgt über die Google Earth API COM.

#### 3.1 Google Earth COM API

Die bei GE integrierte Schnittstelle (API, Application Programming Interface) ermöglicht die Manipulation von GE von aussen. Somit kann mit eigens definierten Algorithmen das Verhalten von GE gesteuert und für den Nutzer unsichtbare Parameter ausgelesen oder eingegeben werden. Beispielsweise kann so die Erdkugel ohne Einfluss des Nutzers gedreht oder auch der Koordinatenbereich eines bestimmten Bildausschnittes erfasst werden (GOOGLE EARTH COM API 2007).

#### 3.2 Benutzerdefinierte Visualisierungsbereiche

Wie oben beschrieben, erfolgt die Reduzierung der Bilddaten über die Erstellung von Bildpyramiden. Zusätzlich dazu wird das umfassende 3D-Modell auf die in einer vom Benutzer definierten Region liegenden Modelle reduziert. Dafür wird zu jedem Objekt (z.B. Gebäude) dessen Mittelpunkt-Koordinaten berechnet. Liegen diese Koordinaten in der definierten Region, werden die dazugehörigen Objekte, welche einzeln gelagert sind, visualisiert. Dadurch werden lediglich die vom Benutzer gewünschten Daten angezeigt.



Abbildung 4: Schema Steuerung Daten - GE mittels API

## 4 Mögliche Anwendungen

Durch die beschriebenen Verfahren, externe Daten zu integrieren, können beliebig erweiterbare Informationssysteme entwickelt werden, die sich GE als Visualisierungsinstrument zu Nutze machen. Dadurch ergibt sich der Vorteil, dass die Daten unabhängig von der verwendeten Visualisierungsumgebung gelagert werden können.

#### 4.1 Beispiel: Personen – Informationssystem

Als Beispielsanwendung wurde ein Personen-Informationssystem entwickelt, welches Daten von ETH Mitarbeitern verwaltet und visualisiert. Als Resultat einer Abfrage (per HTML-Formular) werden dynamisch die nötigen Angaben zu Arbeitsort und weitere relevante Daten in einer KML-Datei abgelegt und in GE visualisiert. Die Personalien werden aus der externen Datenbank ,ETH Phonebook' ausgelesen. Als Identifikation dient dabei das Gebäudekürzel, welches zusammen mit den Gebäudekoordinaten in einer lokalen Datenbank abgelegt ist. Um die enormen Daten in ökonomischen Ladezeiten zu integrieren, werden lediglich die Gebäude der näheren Umgebung dargestellt.



Abbildung 5: Schema Personen-Informationssystem, http://www.visu.ethz.ch/gerhard/PhoneBook/

Problemlos kann das bestehende Informationssystem mit weiteren Datenbanken erweitert werden. So ist beispielsweise eine Erweiterung mit Darstellung von Webcam-Streams durchaus machbar.

#### 4.2 Resultate

Für die Umsetzung des Informationssystems wurde ein Orthophoto der ETH Hönggerberg mit 5cm Bodenauflösung verwendet. Diese 680 MB grosse Datei wurde zu einer Bildpyramide umgewandelt, welche 1365 Teile zu je 665KB umfasst. Ein 8100 Gebäude umfassendes Stadtmodell Zürichs dient als Grundlage für die 3D-Modelle. Jedes Objekt ist mit Dachtextur versehen. Entsprechend der vom Nutzer definierten Region wird lediglich eine beschränkte Anzahl Gebäude dargestellt.



Bild-Overlay 3D-Modell inkl. Dachtextur Kombination Abbildung 6: Verfahren der Datenintegration am Beispiel ETH Hönggerberg

#### 4.3 Erweiterbarkeit / Open Source

Die in Python (VAN ROSSUM 2006) als Open-Source-Anwendung entworfenen Algorithmen sind unter http://pygeimporter.sourceforge.net erhältlich und können frei verwendet und erweitert werden.



Abbildung 7: Visualisierung Abfrageergebnis

# 5 Literaturverzeichnis

BECK, M., BLASER, T., MACH, R., 2006: Value of Virtual Globes and 3D Visualization, Geoinformatics, 4-9-2006

BILL, R., 1999: Grundlagen der Geo-Informationssysteme, Band 1, Herbert Wichmann Verlag GOOGLE EARTH COM API DOCUMENTATION: Letzter Zugriff: 31. März 2007,

http://earth.google.com/comapi/

KAHLE, H.-G., 2004: Einführung in die Höhere Geodäsie, Vorlesungsskript, ETH Zürich KML 2.1 REFERENCE: Letzter Zugriff: 12. Januar 2007, http://earth.google.com/kml/

LUTZ, M. 2006: Programming Python, O'Reilly Verlag

PYTHON IMAGING LIBRARY HANDBOOK: Letzter Zugriff: 25. Februar 2007, http://www.pythonware.com/library/pil/handbook

SWISSTOPO, 2006: Formeln und Konstanten für die Berechnung der Schweizerischen schiefachsigen Zylinderprojektion und der Transformation zwischen Koordinatensystemen

VAN ROSSUM, G. & DRAKE, F., 2006: Python Library Reference, Release 2.4.4

# swisstopo's Topographic Geographic Information system TOPGIS

#### THOMAS KUNZ, EMANUEL SCHMASSMANN & WILLIE O'SULLIVAN<sup>1</sup>

Summary: The Swiss Federal Office of Topography (swisstopo) is in the process of setting up a new production infrastructure (TOPGIS) for maintaining the Topographic Landscape Model (TLM). TLM is the new three-dimensional base model covering the whole of Switzerland. It will form the basis for several GIS-datasets and the production of the Swiss National Maps. An important addition to TLM will be the new Digital Terrain Model (DTM-TLM), which will have the same updating cycle as TLM. The accuracy of most objects captured in TLM will be one meter or better. A common-for-all GIS-editor ("corporate editor") will be used to ensure the easy editing of geometry and attributes for all users. Every feature will be stored in a geo-database with three-dimensional coordinates. The high quality of the data will be guaranteed by an extensive set of tests which the operators can run at different stages in the workflow. The data will be edited either in the 3D-editing mode or in the so called 2.5D-editing mode both of which are totally integrated into the GISenvironment. The 3D-editing mode will be used in the stereo-view using a specially designed digital photogrammetric toolset extension. The 2.5D editing mode will use DTM-TLM as a Z-lookup for supplying the Z-coordinate during mono-digitising. It will also be possible to check-out TLM data for editing and verification for use directly in the field. The DTM-TLM will be updated using specially designed photogrammetric DTM-editing tools which will be integrated into swisstopo's corporate editor. The DTM will also be stored in a geo-database. The updating of TLM and DTM-TLM will be mostly carried out using the high resolution digital imagery taken with swisstopo's ADS40 camera. The TOPGIS system which will contain TLM and DTM-TLM will be based on ArcGIS/ArcSDE from ESRI and the Stereo Analyst for ArcGIS extension from Leica.

## 1 Introduction

GIS and photogrammetry have co-e xisted side by side in sw isstopo's organisation for many vears but with little or no direct interaction. Recently however with the advent of completely digital photogrammetric production environments such as digital aerial cameras, digital photogrammetric workstations, and large database data-sets such country-wide digital orthophoto coverage and highly accurate digital terrain models does it make sense to utilise the flexibility of GIS and central geo-databas es to manage all such GIS relevant data and associated reference data in a powerful all encompa ssing GIS environment. In the geo-database geographic information is represented using standard re lational database technology. The geo-database supports the storage and management of ge ographic information in standard database management system (DBMS) tables. A geo-database can store object s, such as vector features, raster data, terrain features, surv ey data, annotation features, non-spatial tables, spatial relations such as geometric networks and topology, re lationship classes, validation rules, domains, etc. In this way all data starting from the aerial image e meta-data to the 3D vector data, geographic names, DTM data, orthophotos, satellite orthophotos etc. can be stored on one or more

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> thomas-kunz@swisstopo.ch; emanuel.schmassmann@swisstopo.ch; liam.osullivan@swisstopo.ch

centralized Oracle databases. They can then be accessed and used for reading and writing or import/export by large numbers of users in a client-server environment.

## 2 Present updating at swisstopo

The Swiss Federal Office of Topography's major products such as cartographic base map 1:25,000 and 1:50,000 etc. as well as the most important vector products such as the vector landscape model VECTOR25 (VEC25) or the Swiss Names Database are at present being updated independently of each other. Some products such as the 1:25,000 map based Digital Height Model (DHM25) and even the new Lidar DTM product DTM-AV are not being updated at all.

The 1:25,000 base map is updated on a sheet by sheet basis every six years from analogue photography using analytical photogrammetry by comparing changes between the stereo models and the 1:25,000 raster maps. Documented changes recorded in the analogue revision atlas after the previous revisions are also reviewed. Mutations are captured into an object coded vector file superimposed on the raster map. Stereo vector superimposition is not available. After verification in the field the vector updates are delivered to the cartography dept. in 2D CAD format for rasterisation and integration into the pixel maps, the 3<sup>rd</sup> dimension gathered at the photogrammetric stage is not used in the production process. Although the cartography department's current production method - a mix of raster data and CAD - provides excellent graphical results, the updating process is very time consuming and the resulting raster data allows only very limited flexibility for further processing.

VECTOR25 is a seamless 2D digital landscape model of Switzerland comprising of about 5 million objects showing their position, form and attributes, it has the same accuracy and up-todateness as the 1:25,000 maps (3-8m) but is limited to a map based content and is updated from the updated base maps. Developments over the past years led to this dual updating process, which is rather cumbersome for the users (heterogeneous production environments, data exchange via interfaces etc.), is considered wasteful of resources and also creates an unnecessary delay in that it is impossible to update VECTOR25 more frequently than once every 6 years. Recently photogrammetric data has been used to also update VEC25 but for technical reasons only a small portion can be updated in this way and the rest remains dependent on the maps with a resulting updating delay of 3-4 years after the aerial photography flights. The result is customers receive out-of-date data which cannot be geometrically improved using the present methods.

The Swiss Names database has been used for updating the names on all the Swiss map scales and has therefore also been map based. Importantly the names only have a single geographical reference point. Parallel to this VEC25 has maintained attributes for the same names on some of its objects such as rivers. Therefore data has been collected and maintained in parallel.

Field updating has come a long way since analogue maps were taken into the field to be verified. Only in the last two years have field topographers been taking digital photogrammetric vector data and VEC25 data with them into the field for verification using mobile GPS handheld devices. Editing takes place in the field but most of this is spaghetti data and has to be integrated back into the CAD data being prepared for the map updating.

These various updating methods have developed independently over the years and are slowly outliving their usefulness. The dependency of VEC25 and Swiss names on the map updating must be uncoupled. It is necessary to eliminate this independent, un-coordinated and parallel updating and replace it by one updating operation of a central data-set from which all products can be derived. Realizing this goal will mean that a large part of the present production flow will need to be reversed (see diagram 1). It will shorten the production of the data as the updating can take place independently and more frequently than the 6 year map production cycle. This central data set will be the Topographic Landscape Model (TLM). The project TLM has the goal of creating and maintaining TLM and DTM-TLM for the whole of Switzerland and parts of neighbouring countries up to and including the perimeters of the present 1:25,000, 1:50,000 and 1:100,000 maps. Parallel to TOPGIS the project OPTINA is creating the GENIUS-DB (database), also an ESRI technology GIS based customised cartographic production system. TLM data will be the base data which will supply the GENIUS-DB.



Diagram 1: Reorganization of vector collection

# 3 TOPGIS the infrastructure

TOPGIS is a modern database based system comprising of hardware and software for the capture, editing, management, storage and distribution of the TLM. The associated Digital Terrain Model (DTM-TLM) will also be edited using TOPGIS. After a public WTO tender, the bid was won by a consortium led by ESRI Geoinformatik AG Switzerland. The TOPGIS system is now being built by ESRI, Leica Geosystems, Er nst Basler + Partner, Geocom, Geo7, Trivadis and INSER.

TOPGIS is completely ArcGIS based including desktop, server, and mobile GIS. It comprises especially build extensions for data capture and management (see diagram 2). It has fully integrated photogrammetry through the development of the extended Stereo Analyst extension for ArcGIS (SAFA) from Leica. Such a total integration is a premier in the GIS/Photogrammetry world. Oracle RDBMS, ArcSDE will provide the infrastructure for the central GIS database. ArcGIS Desktop is the pl atform for the viewing and digitising an d editing environment of the TLM. SAFA provides a platform for newly develo ped photogrammetric tools for the viewing, digitising and editing environment of the TLM and DTM-TLM data. The existing mobile field clients (ArcPad) have considerable software enhancements compared to the current version. The concept of the Corporate Editor which is a common look and feel used for all tools for manipulating and managing topo graphic information throughout the organization has been implemented. A specifically developed Data Dictionary provides functionality for the administrators to centrally manage and configur e TOPGIS such as default settings of snapping, symbology etc. It is expected that the system will become operational for full production in the spring of 2008.



Diagram 2: TOPGIS System Architecture

With TOPGIS the infrastructure as well as the all encompassing GIS-functionality for processing and administrating the TLM in a central database is available. TOPGIS is at the core of swisstopo's geodata infrastructure and will in fact be the server of GIS data to any number of today's and future products.

About 50 people will be using the TOPGIS system, about 20 of them will be stereo stations. The Planar stereo screen is used for stereo viewing.

Several other tools are also being developed which are too numerous for this paper such as those for quality assurance and topology tests and 3D tests etc. A da ta-hub has been developed to allow conversion for the import and export need s of TOPGIS, an attr ibute editor with an extensive name editor, tools for integrating external data, tools for the collecting and maintaining

revision cues and extensive DT M generation and editing tools etc. An extensive backup and restore system is obviously an important part of TOPGIS.

# 4 Topographic Landscape Model

TLM is the basis landscape model for Switzerland. It is a seamless GIS containing 3D primary geometry without generalisation with an accurace y of better than 1met er in x, y & z. TLM consists of 10 topics which contain several independent datasets previously maintained separately such as boundaries, na mes and terrain (see diagram 3). It also has a revised extended data model to meet the needs of reference partners such as road and water authorities. The approach realized with TOPGIS will make updates of TLM data a lot easier and more frequently possible than the present 6 year map production cy cle (certain often chan ging objects such as streets and buildings will for example be updated annually in a so called top up-to-dateness). All objects have x, y and z coordina tes which also means that objects in TLM should maintain consistency with DTM-TLM, for example roads should lie on the DTM-TLM. TLM is not a product but rather will be the basis for a wi de variety of products including the derived 1:25,000 cartographic base maps. It is also one of the bases for Switzerland's future National Geodata Infrastructure (NGDI).

DTM-TLM is a new accurate DTM compatible to and consistent with TLM. It is derived principally from LIDAR data and will include mass point data and may include breaklines. DTM-TLM will be updated parallel to the updating of TLM. DTM- TLM is a stored in the ne w ESRI Geo-database Terrain format. TLM and DTM-TLM will cover the entire surface of Switzerland with a high accuracy.

TLM and DTM-TLM data is based on the Swiss local reference system (CH1903+ LV95) and the height system LHN95. Transformations from other reference systems and height systems are applied to feature coordinates as they are pr oduced by the relevant sensor geometry model. These derived coordinates are then on-the-fly tr ansformed into the coordinate system of the ArcGIS Map document. The user doesn't need to care about coordinate systems.

# 5 Working with the TOPGIS System

Using the geo-databas e will allo w swisstopo to maintain multiple parallel release cycles and multiple work units of the TLM geodata. Releas e cycles define the data which will be contained in a scheduled TLM release. They are implemented as individual ArcSDE versions and provide isolated database states within which the same objects can be edited in parallel. The versions are organized in a hierarchical structure, i.e. a new version can be derived based on the state of an existing version. Reconcile and post operations are available that allow retrieving changes from a parent version, resolving any conflicts due to parallel edits to the same objects, and posting the state of the current version back to a parent version.



Diagram 3: TLM data model

Work units define a perimeter within which a defined set of layers can be edited. Upon creation, it is assured that the same laye r is not assigned to work un its with overlapping perimeters. Opening a work unit is accomplished using a wi zard that leads the user through the steps of selecting a release cycle, selecting a set of layers to edit, defining the extent, adding background data, and entering the additional properties for the work unit. The contents of work units are readable to all users but only writeable within the work unit itself.

Upon creation of a work unit for 3D capture the user will select images by executing a query on the LUBIS aerial image database. The images can be selected using various criteria such as date, pixel size, image type etc. These image footprints will then be displayed for verification. Both RC30 and ADS40 imagery can be selected and copied to users workstations. During this process images receive their orientation from the LUBIS. The selection and definition of stereo pairs is performed using the extended SAFA Stereo Pair Manager. Stereo pairs are then added to the table of contents and can be easily selected for display.

Although TLM is 3D not all objects will be edited in stereo, ind eed many objects are act ually 2.5D in that the z value is the same as that of the terrain. TOPGIS supports the capture, editing and management of GIS data (TLM and DTM- TLM) in several modes including 3D and 2.5D from the following clients:

 3D client (stereo) for objects which "form or shape" the terrain such waterways, roads, railways and wherever object heights are captured such as roofs, HT poles, bridges etc.

- 2.5D client (mono-plotting) for objects which "sit" on the terrain such as hiking trails, land cover, boundaries etc.
- DTM client (stereo) for DTM-TLM editing
- Mobile client for field editing

These clients may work together or alone, so for example an operator may use the 3D client and the 2.5D client on the same PC as they interact seamle ssly. An object such as a road can be started in 3D and (where for ex ample the ground is no longer visibl e such as in a dense forest) continued in 2.5D and finally finished again in 3D. The operator simply switches from the 3D screen to the 2D screen as the object is always visible on both screens. 3D clients will always be paired with a 2.5D client, but a 2.5D client may and will ex ist independently for no stereo capture such as some attribute collection or name s for example. Similarly the 3D client and the DTM client can operate in para Ilel. Generally however the DTM and 3D clients will be used independently of each other for organisational reasons.

TOPGIS supports the use of a primary and secondary stereo views in addition to the ArcGIS map document window. By default vector contents and symbology on the stereo views will be based on the vector content of the ArcGIS map document in terms of layer order, but with more simplified symbology which can be user or data dictionary defined. Symbology needs to be simplified so that imagery is not obscured by cartographic symbolization. Also imagery will need vector symbology which contrasts well with the background be it b/w or colour imagery, dark forests or bright snow or roads. The sec ondary stereo view will inherit vector symbology from the primary stereo view and the symbology may be modified using the stereo display contents view.

Various SAFE tools are also being developed such as rooftop extraction tools and linear feature extraction tools. Rooftop extraction tools are used to implement the construction of complex roof geometry based on minimal user inputs. A set of primitive rooftop templates have been defined. The user inputs will be sufficient mouse clicks (usually in the stereo window) that define the orientation and geometry of va rious anticipated rooftops. Each rooftop is implemented as a standard edit tool and includes an icon representing the style of roof that is to be implemented. Conversion of the 3D edits ketch into an ESRI multipatch object is performed by the rooftop collection edit task which is similar to a collection of breaklines that are to be triangulated where each triangle face represents a coplanar section of the roof. The rooftop template tools design and implementation is extensible. The linear feature extraction tool is a semi-automatic tool that will allow the operator to perform feature extraction operations on linear features that have relatively uninterrupted representation in the imagery such as rural roads, lake edges, st reams etc. It includes boundary, centre line and ribbon modes. The operator must specify the start point and any intermediate points, such as before and after an occlusion and finally the end point, extraction will extract automatically follow the seed points as the operator digitises. This way the quality of the extraction can be di rectly supervised, if the semi-a utomatic extraction looses its way the user can temporarily switch to manual mode for a difficult area then switch back to discreet or rubber-band mode once the difficuent area has been naviga ted. Extraction can be carried out in 2.5D mode with heights derived from the DTM.



Diagram 4: TOPGIS 2.5D and 3D client with the Planar screen on the right.

# 6 Summary

With the TOPGIS project, the dual updating process of the base map 1:25,000 and of VEC25 will be eliminated and replaced by one updating operation on the new, accurate, non map based 3D central data set TLM and DTM-TLM. TLM is the base landscape model of Switzerland not a cartographic model, i.e. the data is not generalised. It will have an accuracy of better  $\leq$  1m. TLM data will be more up-to-date and the data model can be extended in the future. From TLM both the base map and vector products can be generated and many other products may also be derived from it in the future. With TO PGIS swisstopo has a very modern production infrastructure with a strong emphasis on high performance which will improve productivity and quality and is ready for use used in future projects. TOPGIS will also bene fit from growth in the range of products and extension of features provide d by ESRI and in this way is assured a bright and long las ting future.

# Verbesserte DGM-Erstellung mittels Full-Waveform Airborne Laserscanning

# C. BRIESE<sup>1</sup>, M. DONEUS<sup>2</sup>, N. PFEIFER<sup>3</sup> & T. MELZER<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Das flugzeuggetragene (airborne) Laserscannig (ALS) hat sich in den letzten Jahren als Methode zur Erstellung großflächiger Geländemodelle (DGMe) etabliert. Mit Hilfe von Filter- bzw. Klassifizierungsmethoden gelingt es in weitgehend automatisierten Prozessen Nicht-Bodenpunkte (Punkte auf Gebäuden, in der Vegetation, etc.) als solche zu klassifizieren und aus den verbleibenden Bodenpunkten DGMe abzuleiten. Während die Klassifizierung von Boden- und Nicht-Bodenpunkten und auch die Unterscheidung von Echos (Bestimmung mehrer Echos pro ausgesandtem Laserpuls) in Bereichen hoher Vegetation bei konventionellen ALS Systemen zuverlässig möglich ist, stößt man allerdings bei niedriger Vegetation an die Grenze des Trennvermögens (Überlappung von Boden- und Vegetationsecho bedingt durch die Länge der ausgesandten Laserpulse) und auch an der Klassifizierungszuverlässigkeit.

Im Gegensatz zu den konventionellen ALS Systemen ermöglichen die so genannten Full-Waveform ALS (FWF-ALS) Systeme die Digitalisierung der gesamten im Empfänger detektierten rückgestreuten Laserenergie und bieten den Vorteil, dass auf Basis der verspeicherten Wellenform im post-processing neben den einzelnen Echos auch noch weitere Beobachtungsgrößen pro Laserpunkt (z.B. Echoweite und Amplitude) bestimmt werden können. Im Rahmen dieser Publikation wird gezeigt, wie diese zusätzlich zu jedem Echo bzw. Laserpunkt zur Verfügung stehende Information des FWF-ALS genutzt werden kann, um eine Verbesserung der DGM-Erstellung vor allem in Bereichen niedriger Vegetation zu erreichen. Neben der Vorstellung des erweiterten DGM-Erstellungsprozesses werden in einem Abschnitt anhand eines praktischen Beispiels die DGMe mit und ohne Berücksichtigung der FWF-Information einander gegenübergestellt. In einem Ausblick wird auf weitere zukünftige Möglichkeiten zur Verbesserung der DGM-Erstellung eingegangen.

# 1 Einleitung

(DGMe) fiir unterschiedliche Digitale Geländemodelle sind viele Anwendungen (Überschwemmungssimulationen, Infrastrukturplanung, Visualisierungsaufgaben, etc.) essentiell. Während in der Vergangenheit großräumige Geländemodelle vor allem mittels analytischer Photogrammetrie erstellt wurden, haben sich in den letzten Jahren automatisierte Verfahren zur Bestimmung von Oberflächenpunkten immer mehr durchgesetzt. Im Gegensatz zu den manuellen Datenerfassungsmethoden, bei denen während der Bestimmung von repräsentativen Oberflächenpunkten eine vom Operator durchgeführte anwendungsspezifische Interpretation der Geländeoberfläche erfolgt, werden bei automatisierten Verfahren, wie z.B. der

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Christian Briese, Thomas Melzer: Christian Doppler Laboratory "Spatial Data from Laser Scanning and Remote Sensing", Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.), Technische Universität Wien, Gußhausstraße 27-29/E122, 1040 Wien, Österreich

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Michael Doneus: Institut f
ür Ur- und Fr
ühgeschichte, Universit
ät Wien, Franz-Kleingasse 1, 1190 Wien, Österreich

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Norbert Pfeifer: Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.), Technische Universität Wien, Gußhausstraße 27-29/E122, 1040 Wien, Österreich
automatischen digitalen Bildzuordnung oder dem flugzeuggetragenen (Airborne) Laserscanning (ALS), in systematischer Weise Oberflächenpunkte bestimmt. Bei diesen automatischen Datenerfassungsverfahren erfolgt während der Bestimmung von Oberflächenpunkten typischerweise keine Interpretation der Oberfläche. Als Ergebnis erhält man im Allgemeinen unattributierte Punktwolken, die eine unstrukturierte Oberflächenbeschreibung darstellen. Die automatisch bestimmten Punkte liegen auf den unterschiedlichsten Oberflächen, wie z.B. auf Gebäuden, dem Gelände, aber auch auf temporär auf der Oberfläche vorhanden Objekten, wie z.B. Fahrzeugen. Um auf Basis dieser Daten, die unterschiedliche Oberflächenobjekte repräsentieren, ein DGM zu erstellen, ist daher eine möglichst automatische (aufgrund der Datenmenge) Klassifizierung der Daten, die auch oft als Filterung bezeichnet wird, in geländerelevante (Bodenpunkte) und nicht geländerelevante Punkte (Nicht-Bodenpunkte)

Zur großflächigen Erfassung der Geländeoberfläche (von wenigen Quadratkilometern bis hin zur landesweiten Datenerfassung) hat sich in den letzten Jahren besonders das ALS etabliert (KRAUS, 2004). Im Gegensatz zur Datenerfassung mittels der Luftbild-Photogrammetrie liegt dem ALS ein aktives Messprinzip, das eine direkte dreidimensionale Bestimmung von reflektierenden Oberflächenpunkten aus einer Blickrichtung ermöglicht (polare Erfassung) in Kombination mit Sensoren zur direkten Georeferenzierung, zugrunde (vgl. WEHR & LOHR, 1999 oder KRAUS, 2004). Dieses Messprinzip, das unabhängig von anderen Beleuchtungsquellen eingesetzt werden kann, zeichnet sich vor allem auch in bewaldeten Bereichen dadurch aus, dass der ausgesandte Laserstrahl innerhalb der beleuchteten Fläche (footprint) kleine Lücken in der Vegetationsdecke durchdringen kann und dadurch zeitversetzte Echos von unterschiedlichen reflektierenden Objektoberflächen empfangen werden können.

Zur diskreten Verspeicherung des empfangenen analogen Signals findet man beim ALS momentan zwei unterschiedliche Konzepte. Die Mehrzahl der zur Verfügung stehenden Systeme nutzt konventionelle analog basierte Techniken zur Detektion der Echos (diskrete Echo Systeme). Diese Systeme verspeichern den jeweiligen Zeitstempel sowie eine repräsentative Signalstärke (Amplitude, oft auch als Intensitätswert bezeichnet) des detektierten Echos. Im Gegensatz zu den diskreten Echo Systemen zeichnen einige neu zur Verfügung stehende Sensoren, so genannte full-waveform ALS (FWF-ALS) Systeme, das gesamte im Empfänger über dem Detektionsschwellwert liegende Signal auf. Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit diesen beiden unterschiedlichen ALS Prinzipien. Anschließend wird im nächsten Abschnitt auf die zusätzliche Information, die durch FWF-ALS Systeme pro detektiertem Echo zur Verfügung steht, eingegangen. Danach wird anhand eines praktischen Beispiels gezeigt, wie mit einem einfachen Verfahren (publiziert in der Veröffentlichung DONEUS & BRIESE, 2006) diese zusätzliche Information zur Verbesserung der DGM-Erstellung beitragen kann. Das abschließende Kapitel dieser Publikation widmet sich einer Diskussion über weitere zukünftige Möglichkeiten zur Verbesserung der DGMe, basierend auf zusätzlichen Informationen pro detektiertem Echo.

# 2 Diskrete Echo vs. Full-Waveform ALS Systeme

Zur Entfernungsmessung verwenden ALS Systeme beinahe ausschließlich das Prinzip der Pulslaufzeitmessung. Dabei wir ein kurzer Laserpuls (typischerweise Länge: 5-10ns) ausgesandt und über die Zeitdifferenz zwischen dem ausgesandtem Puls und dem detektierten Echo kann die Entfernung zum jeweiligen reflektierenden Oberflächenelement bestimmt werden (weitere Details und Referenzen sind den Publikationen WEHR & LOHR, 1999 sowie PFEIFER & BRIESE, 2007 zu entnehmen).



Abb. 1: Airborne Laserscanning (ALS); Empfangene Signalstärke (ALS Empfänger, erste Zeile); Bestimmung diskreter Echos (ALS Empfänger, zweite Zeile) vs. full-waveform Digitalisierung (ALS Empfänger, dritte Zeile).

In Abbildung 1 ist dieses Entfernungsmessprinzip zusammen mit den beiden unterschiedlichen Methoden zur Diskretisierung der empfangenen Wellenform schematisch dargestellt. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, nutzen konventionelle diskrete Echo-Sensoren analoge Detektoren zur

Bestimmung der empfangenen Echos (vgl. Abb. 1, ALS Empfänger, zweite Zeile). Diese Systeme verspeichern pro detektiertem Echo die Laufzeit sowie den bereits erwähnten Intensitätswert. Sie können dabei zumeist im Fall von mehreren Echos pro ausgesandtem Laserpuls sowohl das erste als auch das letzte Echo bestimmen und verspeichern. Einige weiterentwickelte diskrete Echo Systeme verspeichern zudem auch noch weitere Zwischenechos. Während die Trennung zwischen ersten Echos aus hohen Vegetationsschichten und letzten Boden-Echos zuverlässig möglich ist, stößt man allerdings bei niedriger Vegetation an die Grenze des Trennvermögens, da sich - bedingt durch die Pulslänge (5ns entsprechen einer Länge von 1.5m) das Boden- und Vegetationsecho überlagern (falls die Entfernung zwischen den Objekten kleiner ist als die halbe Pulslänge) und somit die analogen Detektoren keine zwei getrennten Echos bestimmen können (KRAUS, 2004). Im Falle der Überlagerung wird somit ein einziges Misch-Echo aus den beiden überlagernden Signalen registriert. In Abb. 1 ist dieser Fall am Beispiel des letzten Echos dargestellt. Aus dem letzten detektiertem (Misch-)Echo ergibt sich in diesem synthetischen Beispiel ein Punkt der zwischen dem niedrigen Vegetationsniveau und der Geländeoberfläche liegt. Im Gegensatz uu den konventionellen diskreten Echo Systemen verspeichern FWF-ALS Sensoren die gesamte zum Empfänger rückgestreute Laserenergie pro ausgesandtem Laserpuls. D.h. die Bestimmung der Echos muss nicht in Echtzeit während der Datenaufnahme erfolgen, sondern kann später im post-processing mit individuellen Algorithmen, die auch an die jeweilige Anwendung (DGM, Vegetationskartierung, etc.) angepasst werden können, unabhängig von analogen Detektoren durchgeführt werden. So könnte man speziell auch auf das Problem von sich überlagernden Echos eingehen und versuchen die Trennung der beiden Echos durch ein geeignetes post-processing Verfahren zu ermöglichen. Typischerweise erfolgt diese Diskretisierung der Wellenform bei den im Moment verfügbaren FWF-ALS Sensoren mit einem Zeitintervall von 1ns. Im Folgenden Abschnitt wird neben den Möglichkeiten zur Verbesserung der DGM-Erstellung zunächst näher auf das post-processing zur Bestimmung der Echos sowie auf die zusätzlich bestimmbaren Beobachtungsgrößen pro Echo eingegangen.

#### 3 Verbesserte DGM-Erstellung mittels Full-Waveform ALS

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der verbesserten DGM-Erstellung aus FWF-ALS Daten. Bevor aber konkret auf die erweiterten Prozessierungsmöglichkeiten eingegangen wird, behandelt das Unterkapitel 3.1 das post-processing der verspeicherten FWF Daten und geht auf zusätzliche Kenngrößen, die pro detektiertem Echo bestimmt werden können, ein.

#### 3.1 Zusätzliche Kenngrößen pro detektiertem Echo

Das im Empfänger registrierte Signal  $P_r(t)$  ergibt sich aus der Faltung des ausgesandten Laserpulses mit der beleuchteten Objektoberfläche (vgl. WAGNER et al., 2006). Da zumeist davon ausgegangen wird, dass der ausgesandte Laserpuls durch eine Gauß-Glockenkurve approximiert werden kann, wird das verspeicherte Echo zumeist auch als eine Funktion, die aus einer Summe von Gauß-Kurven besteht, modelliert (HOFTON et al., 2000, WAGNER et al., 2006, vgl. Abb. 2). Dazu werden meistens zunächst die Anzahl der Echos (lokale Maxima) sowie deren näherungsweise Position der maximalen Amplitude bestimmt. Auf Basis dieser Näherungen kann nun durch Minimierung der Residuen zwischen Modell und Beobachtungen ein Modell der verspeicherten Wellenform bestimmt werden. Dabei beschreiben die einzelnen bestimmten Gauß-Kurven die jeweiligen Echos (vgl. gestrichelte Kurven in Abb. 2).



Abb. 2: Modellierung der verspeicherten Wellenform (schwarze Punkte) mittels der Summation von Gaußschen-Glockenkurven (Rot: Summe aller Glockenkurven, Grau gestrichelt: individuelle Gauß-Kurven pro Echo); Neben der Entfernung R<sub>i</sub> kann man die einzelne Echos durch weitere Kenngrößen, wie die Amplitude A<sub>i</sub> und die Echoweite EW<sub>i</sub> charakterisieren (vgl. Echo 4).

Abbildung 2 zeigt die verspeicherten Amplitudenwerte der Wellenform, die individuellen Gauß-Kurven pro Echo, sowie das Gesamtmodell des an die Daten bestangepassten Modells. Auf Basis dieses Modells können weitere charakteristische Kenngrößen pro Echo, wie die maximale Amplitude A<sub>i</sub> und die Echoweite EW<sub>i</sub>, bestimmt werden (vgl. Abb. 2). Während die Amplitude die Rückstrahleigenschaften der beleuchteten Objektoberfläche charakterisiert, beschreibt die Echoweite, die unter der Annahme gleicher Rückstrahleigenschaften, die Laufzeitvariationen (= Entfernungsvariationen) aller kleinen Oberflächenelemente die zur Ausprägung des Echos beigetragen haben. So deutet eine große Echoweite (in Relation zur Weite des ausgesandten Pulses) darauf hin, dass mehre Objektoberflächen in unterschiedlicher Entfernung zu dem Signal beigetragen haben (Echoüberlagerung), während eine kleine Echoweite auf ein glattes (in Bezug zur Strahleinfallsrichtung) Oberflächenelement schließen lässt. Im Folgenden wird gezeigt wie diese zusätzliche Information aus den FWF Daten zur Verbesserung der DGM Modellierung genutzt werden kann.

#### 3.2 Verbesserte DGM- Erstellung anhand eines praktischen Beispiels

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, ist zur DGM-Erstellung aus ALS Daten eine Klassifizierung der ALS Daten in Boden- und Nicht-Bodenpunkte notwendig. Für diese Aufgabe wurde bereits eine Reihe von so genannten Filtermethoden publiziert (vgl. SITHOLE & VOSSELMAN, 2004). All diese Verfahren haben gemeinsam, dass sie die Klassifizierung aufgrund

lokaler geometrischer und topologischer Kriterien durchführen. Der Automatisierungsgrad dieser Methoden ist beträchtlich. In Gebieten mit dichter niedriger Vegetation gelingt es aber aufgrund der nicht ausreichenden Bodeninformation (oftmals keine Durchdringung und Überlappung der Boden- und Vegetationsechos) und der geringen Differenz der Nicht-Bodenpunkte zur Geländeoberfläche kaum, eine zuverlässige Klassifizierung der Daten durchzuführen (vgl. PFEIFER et al., 2004).



Abb. 3: Oben Links: Digitales Oberflächenmodell; Oben Rechts: Digitales Geländemodell nach der Elimination der Nicht-Bodenpunkte ohne Berücksichtigung zusätzlicher Information pro Echo; Unten Links: Modell der Echoweiten; Unten Rechts: Verbessertes Digitales Geländemodell durch die Vorelimination der Punkte mit großer Echoweite (DONEUS & BRIESE, 2006).

Um niedrige Vegetation zuverlässig zu erkennen, wurde das Potential der zusätzlichen Informationen, die aus dem FWF-ALS Daten pro Echo abgeleitet werden kann, um Bereiche mit niedriger Vegetation bzw. niedrigen Objekten auf der Geländeoberfläche zu detektieren, untersucht. Die Arbeit wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes (FWF-Projekt P18674-G02) mit dem Ziel, in bewaldeten Gebieten archäologische Strukturen, wie z.B. niedrige Grabhügeln, in der Geländeoberfläche aufzufinden, durchgeführt (Doneus & Briese, 2006). Dazu wurde in einem kleinen Testprojekt untersucht, inwieweit die Echoweite als ein Indiz auf vorhandene niedrige Vegetationsbereiche verwendet werden kann. Wie in der Abbildung 3 ersichtlich ist zeigte sich, dass in diesem Gebiet mittels der Echoweite Punkte bestimmt werden konnten, in

denen die bodennahe Vegetation zu einer zeitlichen Aufweitung des empfangenen Signals geführt hat.

Daher lag nahe, dass durch eine Vorfilterung der letzten Echos (Elimination aller ALS Punkte mit signifikant großer Echoweite) eine Verbesserung der DGM-Erstellung möglich sein sollte. Das Ergebnis einer DGM-Erstellung inklusive dieser Vorfilterung basierend auf der Echoweite pro ALS-Punkt ist ebenfalls in Abbildung 3 ersichtlich. Verglichen mit dem DGM ohne Vorfilterung konnte in Bereichen niedriger Vegetation eine deutlich zuverlässigere Klassifizierung und somit eine verbesserte DGM-Erstellung ermöglicht werden. So stand ein deutlich verbessertes DGM für die archäologische Interpretation zur Verfügung. Dieses erweiterte Verfahren zur DGM-Erstellung war die Basis zur Detektion von niedrigen Grabhügeln, da so nun zuverlässig Bereiche mit niedriger Vegetation, die sich zuvor in Visualisierungen des konventionell erstellten DGMs (ohne Berücksichtigung der FWF Information) oftmals ähnlich wie Grabhügel abzeichneten, eliminiert werden konnten.

### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Wie aus dem praktischen Beispiel des vorigen Kapitels ersichtlich ist, erkennt man die signifikante Verbesserung der Geländemodellierung durch Ausnützen der aus den FWF Daten abgeleiteten Echoweite. Allerdings sollte der Ansatz zur Vorelimination der Punkte nur einmal das Potential dieser Zusatzinformation ausloten und zu einer raschen Lösung des Problems für die archäologische Interpretation führen. Im Folgenden wird zu diesem Ansatz kritisch Stellung genommen und weitere zukünftige Möglichkeiten zur Nutzung des Potentials der FWF Information werden diskutiert.

Zunächst muss erwähnt werden, dass eine Aufweitung der Echoweite auch durch Höhenvariation der Geländeoberfläche (starke Geländeneigung innerhalb des footprints) zu erwarten ist. Dieser Fall konnte im Rahmen des Testbeispieles nicht untersucht werden, da die Geländehöhenvariation innerhalb des in diesem Fall sehr kleinen footprints (0.3m) gering war. Sollten starke Geländeneigungen und somit Höhenvariationen innerhalb des footprints existieren müssten diese berücksichtigt werden. Außerdem muss erwähnt werden, dass die Genauigkeit der Bestimmung der Echoweite von der Signalamplitude abhängt. Bei schwachen Signalen ist die Echoweite nicht zuverlässig. Daher sollte die Echoweite bei Echos mit geringer Amplitude nur bedingt für eine Klassifizierung der Daten eingesetzt werden. Eine Abschwächung der Amplitudenwerte der letzten Echos im Fall von Mehrfachreflexionen wurde bereits in der Publikation WAGNER et al., 2007 untersucht und anhand praktischer Beispiele demonstriert. Zusätzlich wird in dieser Publikation auch die zu Hilfenahme der so genannten backscatter cross section zur Klassifizierung von Vegetationsechos beschrieben.

Wie in dem Beispiel im Abschnitt 3 ersichtlich ist, ermöglicht die zusätzliche FWF Information auf Basis der Echoweite, die eventuell auch mit analogen Detektoren bestimmt werden könnte, eine zuverlässigere Klassifizierung von Echos die aus der Interaktion mit niedriger Vegetation stammen. Für die Klassifizierung und DGM-Erstellung wäre es allerdings interessant auch noch

weitere Informationen zu bestimmen (Genauigkeit der Entfernungsmessung, Zuverlässigkeit der Echoweite, backscatter cross section, Analyse der Residuen der FWF Daten in Bezug zu dem bestimmten Modell der Wellenform, …). Um das Potential von ALS Systemen, die weitere Informationen zum jeweiligen bestimmten Echo zur Verfügung stellen können, abschätzen zu können, sind weitere genauere Untersuchungen der verspeicherten FWF Information und eine detailliertes Verständnis der Interaktion des Laserstrahles mit den natürlichen Oberflächen notwendig.

#### 5 Literaturverzeichnis

- DONEUS, M., & BRIESE, C., 2006: Digital terrain modelling for archaeological interpretation within forested areas using full-waveform laserscanning. In: M. Ioannides, Arnold, F. Niccolucci and K. Mania (Editors), The 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST (2006).
- HOFTON, M.A., MINSTER, J.B. & BLAIR, J.B., 2000. Decomposition of Laser Altimeter Waveforms. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38: 1989-1996.
- KRAUS, K., 2004: Photogrammetrie, Band 1, Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. Walter de Gruyter, Berlin, ISBN 3-11-017708-0, 516 pages.
- PFEIFER, N., & BRIESE, C., 2007: Laser Scanning Principles and Applications. Proceedings of the Geo-Sibiria Congress 2007, Novosibirsk.
- PFEIFER, N., GORTE, B., & ELBERNIK, S.O., 2004: Influences of Vegetation on Laser Altimetry -Analysis and Correction Approaches. In: M. Thies, B. Koch, H. Spiecker and H. Weinacker (Editors), Proceedings of Natscan, Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment - Instruments, Processing Methods and Applications. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXVI, Part 8/W2, pp. 283-287.
- SITHOLE, G. & VOSSELMAN, G., 2004. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 59.
- WAGNER, W., HOLLAUS, M., BRIESE, C., & DUCIC, V., 2007. 3D vegetation mapping using small-footprint full-waveform airborne laser scanners. Submitted to the International Journal of Remote Sensing.
- WAGNER, W., ULLRICH, A., DUCIC, V., MELZER, T. & STUDNICKA, N., 2006. Gaussian decomposition and calibration of a novel smallfootprint full-waveform digitising airborne laser scanner. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 60(2): 100-112.
- WAGNER, W., ULLRICH, A., MELZER, T., BRIESE, C. and KRAUS, K., 2004. From Single-pulse to Fullwaveform Airborne Laser Scanners: Potential and Practical Challenges. In: O. Altan (Editor), Geo-Imagery Bridging Continents. XXth ISPRS Congress, 12-23 July 2004 Istanbul, Turkey International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXV, Part B/3, Istanbul, pp. 201-206.
- WEHR, A. & LOHR, U., 1999. Airborne laser scanning an introduction and overview. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54(2-3): 68-82.

# Erweiterung der Linearen Prädiktion – Berücksichtigung zusätzlicher Linien-, Flächennormalen- und Krümmungsbeobachtungen

#### JOHANNES OTEPKA<sup>1</sup>, CHRISTIAN BRIESE<sup>2</sup> & NORBERT PFEIFER<sup>2</sup>

Zusammenfassung: Die Lineare Prädiktion ist aufgrund ihrer flexiblen Eigenschaften eine weit verbreitete Interpolationsmethode in den Geowissenschaften. Der vorliegende Artikel beschreibt ein erweitertes mathematisches Modell, welches auf dem aus der Geostatistik stammenden Kriging basiert. Die Erweiterungen erlauben morphologische Information, wie Bruchkanten, Formlinien und markante Höhenpunkte, im Rahmen der Flächenbeschreibung zu berücksichtigen.

# 1 Einleitung

Die Lineare Prädiktion (LP) kann als Spezialfall des – aus der Geostatistik stammenden – Kriging interpretiert werden (z.B. KRAUS (1998)). Während die LP durch geometrische und statistische Anschauung geprägt ist (sie wird auch als Interpolation durch Flächensummation bezeichnet), begründet sich das Kriging ausschließlich auf ein statistisches Modell. Durch die Äquivalenz der beiden Methoden lässt sich zwischen den unterschiedlichen Anschauungsmodellen und Begriffsausprägungen (im Prinzip) beliebig hin und her wechseln.

Beide Interpolationsmethoden sind grundsätzlich n-dimensional. Im Folgenden beschränken sich die Autoren aber auf den 2 dimensionalen Fall (Flächeninterpolation) und den speziellen Anforderungen im topographischen Bereich zur Ableitung qualitativ hochwertiger Modelle. Dabei wird die Geländehöhe durch die Interpolationsfunktion beschrieben, welche über die Grundrissebene (x und y) parametrisiert wird.

Dieser 2,5D Ansatz kann keine vertikalen oder überhängenden Bereiche beschreiben ("numerisch-vertikal" ist hingegen beherrschbar), was für die praktische Anwendung großflächiger bzw. landesweiter Geländemodelle bis heute keine Limitierung darstellt. Die Situation könnte sich – durch die rasante Entwicklung der Laserscannertechnologie – in den nächsten Jahren verändern (z.B. OTEPKA et. al. (2006), PFEIFER (2002)).

# 2 Grundkonzepte der Linearen Prädiktion

Beim Kriging wird vorausgesetzt, dass die Beobachtungsvariable einem schwach oder auch intrinsisch stationären Zufallsprozess folgt. D.h. die statistischen Momente erster und zweiter Ordnung (=Wartungswert und Varianz/Kovarianz) existieren und sind translationsinvariant. Die Beschreibung des stationären Zufallprozesses erfolgt durch das Variogram bzw. der Kovarianz-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Christian Doppler Laboratory "Spatial Data from Laser Scanning and Remote Sensing", Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, Österreich, jo@ipf.tuwien.ac.at

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, Österreich, (cb, np)@ipf.tuwien.ac.at

funktion, die der Kernfunktion der LP entspricht. Die Kovarianzfunktion (KF) hat maßgeblichen Einfluss auf das Interpolationsergebnis und auf die geometrische Ausprägung der Fläche.

Die entsprechende KF wird beim Krigeschätzer auf Basis eines aus den Beobachtungen berechneten empirischen Variograms bestimmt. D.h. sowohl die Art als auch die Parameter der KF werden aus den Messdaten geschätzt (z.B. OMRE (1984) oder DUTTER (1985)). Bei der LP wird die Art der Kernfunktion oft vorgegeben und nur deren Parameter werden gegebenenfalls angepasst. Dadurch werden bestimmte geometrische Eigenschaften der Interpolationsfläche sichergestellt.



Abb.1: Gauß'sche KF und die dazugehörige interpolierte Fläche eines Testsgebietes.

Abb.2: Sphärische KF und die dazugehörige interpolierte Fläche eines Testsgebietes.

Während die Gauß'sche KF zu einem glatten Verlauf der Interpolationsfläche führt (Abb. 1), erhält man mit einer sphärischen KF C1-Unstetigkeiten (Unstetigkeit in der 1. Ableitung) in den Datenpunkten (Abb. 2). Als Interpolation mittels Flächensummation gedeutet, ergibt sich die resultierende Fläche als gewichtete Summe aller – in den Datenpunkten angesetzten – Kernfunktionen. Deshalb ist die verwendete KF in Datenpunkten, welche lokale Minima oder Maxima darstellen, wieder zu erkennen. Weist eine KF Unstetigkeitsstellen auf (wie die sphärische KF im Aufstandspunkt), dann übertragen sich diese in die finale Fläche.

Bei den in Abbildung 1 und 2 dargestellten KF wurde Isotropie angenommen. D.h. die Funktionen sind nicht nur translations- sondern auch rotationsinvariant, weshalb sie nur über die Distanz parametrisiert sind. Isotropie ist allerdings keine notwendige Bedingung für die Anwendung der LP. Asymmetrische KF erlauben z.B. systematische Datenfehler zu korrigieren (KRAUS, 1973) oder – wie im Folgenden beschrieben – topographisch relevante Zusatzbeobachtungen zu modellieren.

DGPF Tagungsband xx / 2007

#### 2.1 Anforderungen für Topographische Höhenmodelle

Morphologische Strukturlinien sind essentielle Bestandteile qualitativ hochwertiger topographischer Modelle und sollten während der Interpolation berücksichtig werden, um unerwünschte Ab- bzw. Ausrundungseffekte zu verhindern. Doch auch das finale DTM (Digital Terrain Model) sollte die Strukturlinien beinhalten (siehe Abb. 3). Dies erlaubt die Verwendung größerer Gitterweiten (MANDELBURGER (2006)) und kleine morphologische Strukturen bleiben auch in Folgeprodukten erhalten.



Abb.3: Beispiel eines mit SCOP<sup>3</sup> generierten hybriden DTMs.

Grundsätzlich gibt es zwei Arten von morphologischen Daten die es zu berücksichtigen gilt:

- Linienhafte Beobachtungen (Strukturlinien)
  - o Bruchkanten
  - o Formlinien
  - Punktbeobachtungen
    - o Massenpunkte
    - o Markante Höhenpunkte (lokale Minima oder Maxima)

Geometrisch gesehen stellen Bruchkanten C1-Unstetigkeiten der Oberfläche dar. Eine Formlinie wird im Allgemeinen so interpretiert, dass die Krümmung ein Maximum quer zum Linenverlauf aufweist. Markante Höhenpunkte werden als Oberflächenpunkte mit horizontaler Tangentialebene gedeutet. Die dazu notwendige Erweiterung des Formelapparats ist in der folgenden Sektion beschrieben.

# 3 Mathematisches Model

Beim normalen Kriging (Englisch *Ordinary Kriging*) wird die so genannte Erwartungstreue gefordert, mit anderen Worten die Schätzung soll ohne Bias sein (KRAUS, 2000). Deshalb wird das Gleichungssystem im Unterschied zur LP noch um eine Bedingungsgleichung erweitert. Die geometrische Konsequenz dieser Zusatzbedingung ist, dass in datenlosen Bereichen die

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Für nähere Information zu SCOP siehe Kraus et. al. (2005) oder http://www.inpho.de/

Interpolationsfläche zum Mittelwert aller Datenpunkte strebt und nicht- wie bei der LP - zur XY-Ebene (Z=0).

Die zentrale Gleichung des Krigeschätzers ist durch

$$\begin{pmatrix} C(P_iP_i) & C(P_2P_2) & \cdots & C(P_iP_j) & \cdots & C(P_iP_n) & 1 \\ C(P_2P_i) & C(P_2P_2) & C(P_2P_j) & C(P_2P_n) & 1 \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ C(P_iP_i) & C(P_iP_2) & C(P_iP_j) & C(P_iP_n) & 1 \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ C(P_nP_i) & C(P_nP_2) & \cdots & C(P_nP_j) & \cdots & C(P_nP_n) & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_i \\ \vdots \\ \lambda_n \\ -\mu \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_i \\ \vdots \\ Z_n \\ 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{K} \cdot \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{c} \qquad \text{eq. 1}$$

gegeben, wobei *C* die Kovarianzfunktion,  $\lambda_i$  die Gewichte und  $Z_i$  die Höhenwerte der Punkte  $P_i$  darstellen. Durch Invertieren der Krigematrix **K** lässt sich der Gewichtsvektor  $\lambda$  berechnen.

$$\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{c} \qquad \qquad \text{eq. 2}$$

Die Interpolation des Höhenwertes  $\overline{Z}$  an der Stelle *P* gelingt durch

$$Z = \begin{pmatrix} C(PP_1) & C(PP_2) & \dots & C(PP_n) & 0 \end{pmatrix} \cdot \lambda$$
 eq. 3

#### 3.1 Neigungsbeobachtungen

Die Neigung  $N_F$  einer Fläche F(x,y) ist eine Funktion abhängig vom Ort (x,y) aber auch von der horizontalen Richtung *t*. Mathematisch ist dieser Zusammenhang durch die so genannte Richtungsableitung gegeben.

$$N_F(x, y, t) = \frac{\partial F(x, y)}{\partial t} = \frac{\partial F(x, y)}{\partial x} \cos t + \frac{\partial F(x, y)}{\partial y} \sin t \qquad \text{eq. 4}$$

D.h. eine Neigungsbeobachtung macht nur in Kombination mit seiner Wirkungsrichtung Sinn. Allein daraus lässt sich schon erkennen, dass eine asymmetrische KF notwendig sein muss, um Neigungsbeobachtungen zu berücksichtigen. Im Sinne der Interpolation durch Flächensummation darf die gesuchte KF keinen Höhenauftrag am Aufstandspunkt erwirken (vergleiche Abb. 1 und Abb. 4), muss die umgebende Fläche aber so verändern, dass die gewünschte Neigung im Aufstandspunkt entsteht.



Abb.4: Profil (Vertikalschnitt in Richtung *t*) der Kovarianzfunktion  $C_{\alpha}$ 



Abb.5: Kovarianzfunktion  $C_{\alpha}$  für Neigungsbeobachtungen, wobei die Richtung *t* durch eine transparente Vertikalebene angedeutet ist.

Die nachstehende Kovarianzfunktion  $C_{\alpha}$  erfüllt diese Bedingungen

$$C_{\alpha}(P_i, P_j, t_j) = C_{\alpha}(P_i P_j) = c_0 \frac{dX_{i,j} \cos t_j + dY_{i,j} \sin t_j}{1 + \frac{dX_{i,j}^2 + dY_{i,j}^2}{h^2}}$$
eq. 5

wobei  $dX_{i,j}$  und  $dY_{i,j}$  die Koordinatendifferenz der Punkte  $P_i$  und  $P_j$ ,  $t_j$  der Richtungswinkel der Neigungsbeobachtung,  $c_0$  und h konstante Formparameter darstellen. Die nachstehende Gleichung zeigt wie Neigungsbeobachtungen im Krigesystem berücksichtig werden können.

 $C_z$  stellt dabei eine KF für Höhenbeobachtungen dar (z.B. Gauß'sche KF);  $N_i$ ,  $t_i$  und  $\alpha_i$  die Stützpunkte der Neigungsbeobachtungen sowie die dazugehörige Richtung und Neigungswinkel. Die interpolierte Höhe  $\overline{Z}$  im Punkt *P* berechnet sich aus

$$\overline{Z} = \begin{pmatrix} C_z(PP_1) & \cdots & C_z(PP_n) & C_\alpha(PN_1) & \cdots & C_\alpha(PN_m) & 0 \end{pmatrix} \cdot \lambda$$
 eq. 7

Während die "normale" Krigematrix (Gleichung 1) symmetrisch aufgebaut ist, geht die Symmetrie bei der Berücksichtung von Neigungsbeobachtungen verloren. Wie in Gleichung 6 ersichtlich, werden die Neigungsbeobachtungen in der Zusatzbedingung für die Erwartungstreue nicht berücksichtigt. Dadurch bleibt die geometrische Deutbarkeit (streben der Fläche zum Mittelwert aller Höhenbeobachtungen) erhalten.

Auf die Richtungsableitung von  $C_z$  in Gleichung 6 wird aus Platzgründen verzichtet. Die komplexere Richtungsableitungen von  $C_\alpha$  sei hingegen vollständig wiedergeben:

$$\frac{\partial C_{\alpha}(N_i N_j)}{\partial t_i} = \frac{c_0}{h^2 n^2} \left( \left( h^2 n \cos t_j - 2dX_{i,j} a \right) \cos t_i + \left( h^2 n \sin t_j - 2dY_{i,j} a \right) \sin t_i \right) \equiv \frac{\partial C_{\alpha}(N_j N_i)}{\partial t_j} \quad \text{eq. 8}$$

wobei die Hilfsvariablen *a* und *n* wie folgt definiert sind:

$$a = dX_{i,j} \cos t_j + dY_{i,j} \sin t_j \qquad n = 1 + \frac{dX_{i,j}^2 + dY_{i,j}^2}{h^2}$$
eq. 9

Wie in Gleichung 8 auf der rechten Seite angedeutet gibt es eine Identität, die es erlaubt die Indizes *i* und *j* zu vertauschen. Auf die Beweisführung wird verzichtet, da es keine entscheidende Relevanz die Lösung des Gleichungssystems hat.

Vollständigkeitshalber sei erwähnt, dass Normalvektorbeobachtungen bzw. Tangentialebeneninformation (markante Höhenpunkte) auf jeweils zwei Neigungsbeobachtungen zurückgeführt werden können. Normalerweise berechnet man – aus den ursprünglichen Beobachtungen – die Neigungen in x und y-Richtung und führt diese in das Gleichungssystem ein.



Abb.6: Testbeispiel mit einer Neigungsbeobachtung (links), mit zwei einseitigen Neigungsbeobachtungen (Mitte) und einer Krümmungsbeobachtung (rechts)

Die KF  $C_{\alpha}$  besitzt keine Unstetigkeitsstellen und erzeugt daher einen stetigen Flächenverlauf der Interpolationsfläche im Stützpunkt (siehe links Bild in Abb. 6). Diese Stetigkeit ist aber nicht immer erwünscht: z.B. an Geländekanten gibt es im Allgemeinen unterschiedliche Neigungen links und recht der Kante. Wie man diese "einseitigen" Neigungsbeobachtungen berücksichtigt, kann ist im nächsten Abschnitt beschrieben.

#### 3.2 Einseitige Neigungsbeobachtungen

Die bisher beschriebenen KF wirken immer im gesamten Parameterraum. Will man einseitige Neigungsbeobachtungen in das Krigesystem einführen, muss  $C_{\alpha}$  so modifiziert werden, dass im Halbraum der Wirkungsrichtung die Funktion unverändert bleibt (positiver Ast in Abb. 4) während der andere Halbraum (negativer Ast) vollständig zu Null wird.

$$C_{\alpha}^{1}(P_{i}, P_{j}, t_{j}) = \begin{cases} c_{0} \frac{a}{n} & a \ge 0\\ 0 & otherwise \end{cases} = C_{\alpha}^{1}(P_{i}P_{j}) \neq C_{\alpha}^{1}(P_{j}P_{i})$$
eq. 10

 $C_{\alpha}^{1}$  ist C0-stetig weist aber eine C1-Unstetigkeit entlang der Halbraumgeraden auf. Der Knick der KF ist folglich auch in der Interpolationsfläche zu sehen. Dies erscheint im ersten Moment von geringer Bedeutung, da einseitige Neigungsbeobachtungen nur in Zusammenhang mit Geländekanten verwendet werden. Wird die Wirkungsrichtung orthogonal zur Geländekante gewählt, dann fallen die Halbraumgerade, die Geländekante und der Knick in der Interpolationsfläche zusammen. Probleme ergeben sich aber durch die Tatsache, dass die C1-Unstetigkeit entlang der ganzen (unendlichen) Halbraumgeraden existiert, Geländekanten in der Realität aber nur stückweise gerade sind. Dadurch entstehen an Endpunkten bzw. Kurven der Geländekante deutlich sichtbare Knicke, welche sich nicht mit Geländekanten decken (Abb. 7). Das Stetigkeitsproblem lässt sich durch Multiplikation mit einer geeigneten Glättungsfunktion umgehen. DGPF Tagungsband xx / 2007

$$C_{\alpha}^{\text{lstetig}}(P_i, P_j, t_j) = \begin{cases} c_0 \frac{a}{n} \cdot \frac{a^2}{b^2 + a^2} & a \ge 0\\ 0 & otherwise \end{cases} = C_{\alpha}^{\text{lstetig}}(P_i P_j) \neq C_{\alpha}^{\text{lstetig}}(P_j P_i) \\ b = -dX_{i,j} \sin t_i + dY_{i,j} \cos t_j \end{cases} \text{ eq. 11}$$

Die Hilfsvariablen *a* (Gleichung 9) und *b* können – als in "Hauptlage" – gedrehte Koordinaten interpretiert werden, wobei die positive a-Achse der Richtung der Neigungsbeobachtung entspricht und die b-Achse mit der Halbraumgeraden zusammen fällt. Es lässt sich zeigen, dass  $C_{\alpha}^{1\text{Stetig}}$  C0-stetig ist und C1-stetig, mit Ausnahme des Stützpunktes. Folglich entstehen nur in den entsprechenden Stützpunkten der Interpolationsfläche Knicke. Dies bringt deutliche Vorteile für die Berücksichtigung von Neigungsbeobachtungen in der Praxis (siehe Abb. 8).



Abb.7: Höhenlinienverlauf enthält Knicke (siehe strichlierte Linien) bei Verwendung der KF  $C_{\alpha}^{1}$ 

Abb.8: Glatter Höhenlinienverlauf bei Verwendung der KF C<sub>a</sub><sup>1Stetig</sup>

#### 3.3 Krümmungsbeobachtungen

Unter der Krümmung einer Kurve versteht man die Richtungsänderung pro Längeneinheit. Bei Flächen ist die Krümmung nur im Zusammenhang mit einer Schnittebene eindeutig definiert. Bei gegebener horizontaler Richtung t berechnet sich die Krümmung einer Fläche F aus

$$\kappa = \frac{F''}{\left(1 + F'^2\right)^{3/2}} = \frac{\frac{\partial^2 F}{\partial t^2}}{\left(1 + \frac{\partial F}{\partial t}\right)^{3/2}} = \frac{\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \cos^2 t + 2\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \cos t \sin t + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \sin^2 t}{\left(1 + \left(\frac{\partial F}{\partial x} \cos t + \frac{\partial F}{\partial y} \sin t\right)^2\right)^{3/2}} = \frac{1}{r}$$
eq. 12

Da sich die Krümmung aus dem Quotienten der 2. und der 1. Ableitung der Flächenfunktion berechnet, lässt sich eine Krümmungsbeobachtung nicht ohne weiteres in das Krigesystem integrieren. Die Aufgabe ist nur dann lösbar, wenn die Neigung im entsprechenden Punkt bekannt ist. Dadurch kann man den Nenner der Gleichung 12 auf die Beobachtungsseite bringen und es verbleiben nur die 2. Ableitungen der KF für die Krigematrix. Eine Zeile einer Krümmungsbeobachtung ergibt sich daher zu

DGPF Tagungsband xx / 2007

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial^2 C_{\varepsilon}(K_i P_i)}{\partial t_i^2} & \cdots & \frac{\partial^2 C_{\varepsilon}(K_i P_n)}{\partial t_i^2} & \frac{\partial^2 C_{\alpha}(K_i N_1)}{\partial t_i^2} & \cdots & \frac{\partial^2 C_{\alpha}(K_i N_m)}{\partial t_i^2} & \frac{\partial^2 C_{\kappa}(K_i K_1)}{\partial t_i^2} & \cdots & \frac{\partial^2 C_{\kappa}(K_i K_k)}{\partial t_i^2} & 0 \end{pmatrix} \cdot \lambda =$$
eq. 13  
=  $\kappa_i \cdot \left(1 + \tan^2 \alpha_i\right)^{3/2}$ 

wobei  $K_i$  und  $\kappa_i$  die Krümmungsstützpunkte sowie die entsprechenden Krümmung sind. Wie bei Neigungsbeobachtungen benötigt man eine spezielle KF  $C_{\kappa}$ , die keinen Höhenauftrag im Stützpunkt bewirkt, die umgebende Interpolationsfläche aber so beeinflusst, dass die gewünscht Krümmung erzielt werden kann (ein Beispiel ist in der Abb. 6 (Rechts) dargestellt).



Abb.9: Profil und flächige Darstellung der Kovarianzfunktion C<sub>k</sub>

Die Einschränkung, dass Krümmungen nur in Zusammenhang mit der entsprechenden Neigung berücksichtig werden können, sollte für die Praxis von geringer Bedeutung sein. Krümmungsinformationen können z.B. mittels Extraktion aus den originalen Messdaten gewonnen werden (BRIESE, 2006), wobei die Neigungsinformation im Allgemeinen automatisch mitbestimmt wird.

# 4 Interpretation und Ausblick

Geländekanten haben einen zentralen Stellenwert für hochwertige Geländemodelle. Bei der Interpolation können diese auf unterschiedliche Art berücksichtigt werden. Eine Möglichkeit ist die Aufteilung des Interessensgebietes in unabhängige Interpolationsbereiche. Dies setzt allerdings voraus. dass ein topologisch korrektes bzw. exakt verschnittenes Geländekantennetzwerk existiert (stellt ein Problem der Datenaufbereitung dar) und Geländekanten nicht innerhalb des Interpolationsgebietes enden. Diese - in der Realität häufig vorkommenden - Geländekanten verhindern eine Gebietsaufteilung, weshalb selbst bei der Verwendung von z.B. sphärischen KF, Rundungseffekte an Geländekanten auftreten. Werden zusätzliche Neigungsbeobachtungen eingeführt, können unerwünschte hingegen Rundungseffekte quer zur Geländekante vermieden werden. Die Autoren glauben, dass auf eine Gebietsaufteilung bei Mitverwendung von Neigungsbeobachtungen vollständig verzichtet werden kann. Diese bringt deutliche Vorteilung für die technische Umsetzung der Interpolation. Eine ausführliche Evaluierung diese Annahme steht noch aus. Erste Testergebnisse sind jedenfalls viel versprechend. Neben Geländekanten erlauben die vorgestellten Formeln erstmals

auch die rigorose Berücksichtigung von Strukturlinien sofern Krümmung- und Neigungsinformation vorhanden sind.

Die praktische Relevanz dieser Zusatzbeobachtungen könnte in Frage gestellt werden, da aktuelle Geländemodelle hauptsächlich aus LIDAR Daten bzw. automatisch "gematchten" Punktedaten (digitale Photogrammetrie) berechnet werden. D.h. morphologisch Informationen sind im Allgemeinen nur mehr implizit in der unstrukturierten Punktewolke enthalten. Für qualitativ hochwertige Geländemodelle (z.B. für hydraulische Modellierungen, MANDELBURGER (2006)) müssen kleinere morphologische Strukturen explizit modelliert werden, da jede (approximierende) Interpolationsmethode sonst zu unerwünschten Aus- bzw. Abrundungen führt. Mit speziellen Algorithmen zur Modellierung von Strukturlinien (BRIESE (2004) und BRIESE (2006)) können morphologische Information weitgehend automatisch bestimmt werden, welche dann als Eingangsdaten für die beschriebene Interpolationsmethode dienen können.

**In Memoriam Prof. Karl Kraus** (\* 23. April 1939, † 5. April 2006): Die Lineare Prädiktion war einer der Forschungsschwerpunkte von Prof. Karl Kraus, und er hat bis kurz vor seinem Tode an den theoretischen Grundlagen für diesen Artikel mitgearbeitet.

# 5 Literaturverzeichnis

- BOTTELIER, P., BRIESE, C., HENNIS, N., LINDENBERGH, R. & PFEIFER, N., 2005: Distinguishing features from outliers in automatic Kriging-based filtering of MBES data: a comparative study, in: Geostatistics for Environmental Applications, P Renard, H Demougeot-Renard, R Froidevaux (ed.); Springer, 2005: 403 - 414.
- BRIESE, C., 2004: Three-dimensional modelling of breaklines from airborne laser scanner data, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, 12-23 July 2004.
- BRIESE, C., 2006: Structure line modelling based on terrestrial laserscanner data, Proceedings of Symposium of ISPRS Commission V - Image ENGINEERING and Vision Metrology, H. Maas, D. Schneider (ed.); XXXVI/5 (2006), 1682-1750.
- DUTTER, R, 1985: Geostatistik. Eine Einführung mit Anwendungen, Mathematische Methoden in der Technik, Band 2. Stuttgart, G. Teubner
- KRAUS, K., 1998: Interpolation nach kleinsten Quadraten versus Krige-Schätzer, VGI, Heft 1/98: 45-48.
- KRAUS, K., 1973: Prädiktion und Filterung mit zwei verschiedenen Stützpunktgruppen. Zeitschrift für Vermessungswesen 98: 146-153
- KRAUS, K., 2000: Photogrammetrie, Band 3, Topographische Informationssysteme, Dümmler, Köln: S. 178
- KRAUS, K. & OTEPKA, J., 2005: DTM Modeling and Visualization The SCOP Approach, Photogrammetric Week '05, D. Fritsch (ed.); Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg
- MANDELBURGER, G., 2006, Topographische Modelle für Anwendungen in Hydraulik und Hydrologie, Ph. D. thesis, Vienna University of Technology
- OTEPKA, J., BRIESE, C. & NOTHEGGER, C., 2006: First Steps To A Topographic Information System Of The Next Generation, Proceedings of ISPRS Commission IV Symposium - Geo Spatial Databases for Sustainable Development, Goa, India

- OMRE, H, 1984: The variogram and its estimation. In: Verly G,. David M, Journel AG, Maréchal A, eds, Geostatistics for Natural Resources Characterization, Part 1. Reidel, Dordrecht: 107-125
- PFEIFER, N. & Pfeifer, N. (2002). 3D Terrain Models on the Basis of a Triangulation. Ph. D. thesis, Vienna University of Technology

# Hochwassersimulation im flachen Gelände – sind unsere Geobasisdaten ausreichend?

#### KARSTEN SCHMIDT<sup>1</sup>, KRISTINA NEBEL<sup>2</sup>, HANS-PETER RATZKE<sup>2</sup> HILLRICH SMIT-PHILIPP<sup>1</sup> & MANFRED WEISENSEE<sup>2</sup>

Zusammenfassung: Die stetig zunehmende Bedrohung durch Hochwasserereignisse begründet eine detaillierte Betrachtungs- und Handlungsweise zum Schutze vor wirtschaftlichen, umwelttechnischen und gesundheitlichen Schäden. Als Grundlage für die Risikobeurteilung und die daraus resultierenden Maßnahmen ist eine realitätsnahe Hochwassersimulation unter Verwendung eines genauen Abbildes der Erdoberfläche, in Form eines präzisen digitalen Geländemodells (DGM) in Verbindung mit hydrologischen Analysen, unverzichtbar. In einem EFRE-ESF-Projekt der Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven wird die spezielle Problematik der Simulation im Flachland untersucht mit der speziellen Fragestellung des erforderlichen Detailgrades des DGM. Es wird ein direkter Vergleich zwischen vorhandenen Geobasisdaten und hoch aufgelösten Daten aus einer Airborne-Laserscannerbefliegung mit terrestrischen Ergänzungsmessungen gezogen. Die praktische Anwendbarkeit wird durch einen Einbau von planerischen Maßnahmen in das Modell mit der Ausweisung von Risikoflächen unterstrichen.

# 1 Einleitung

Die Gefahr von Hochwasserereignissen ist in Häufigkeit und Ausmaß in den letzten Jahren drastisch gestiegen, wobei Prognosen für die Zukunft noch extremere Ereignisse ankündigen. Um den Auswirkungen solcher Ereignisse vorzubeugen, sie gar zu verhindern oder zumindest abzumildern, bedarf es eines komplexen Zusammenspiels zwischen Risikobewusstsein, Risikoabschätzung und Risikominderung. Eine tragende Rolle spielt hierbei das Risikomanagementsystem, welches zur Datenverwaltung, Analyse, Visualisierung und als Informationsportal dient. Die Auswirkungen eines Hochwasserereignisses sollen realitätsnah an Hand von Simulationsberechnungen analysiert werden. In flachen Gebieten ist eine Simulation auf Grund der geringen Höhenunterschiede und des daraus resultierenden großflächigen Ausbreitungspotentiales der Wasserflächen besonders problematisch. Bereits kleine Bäche können bei verstärkter Wasserführung großflächige Überflutungen verursachen.

Im Rahmen eines EFRE-ESF-Projektes zur Analyse von 3D-Mechanismen im Bereich Hochwasserschutz im Flachland wurde ein Testgebiet in Niedersachsen zur Beurteilung von Überflutungssimulationen in kleinräumigen Gebieten ausgewählt. Hier bedroht ein Gewässer sensible Bereiche wie z. B. ein Krankenhaus, Tankstellen und mehrere Grundwasserbrunnen. Im Projekt sollen auf Grundlage einer präzisen DGM-Analyse unter Einbeziehung von Kleinstformen verschiedene Hochwasserereignisse simuliert werden, welche in Planungsarbeiten einfließen. Die Frage des notwendigen Detailgrades des verwendeten Geländemodells spielt

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Institut für Mess- und Auswertetechnik, Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik,

Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven

dabei eine wesentliche wirtschaftliche Rolle. In diesem Zusammenhang werden vergleichende Simulationen mit einem DGM basierend auf Geobasisdaten untersucht.

# 2 Datenaufbereitung

Für die Modellberechnung wurde ein Testgebiet bei Westerstede in Niedersachsen ausgesucht, welches die Voraussetzung bezüglich der Flachlandausprägung sowie eines akuten Gefahrenpotentials erfüllt. Der unscheinbare Bach "Kleine Norderbäke" führt in der Trockenzeit kaum Wasser, fällt sogar trocken, bedroht jedoch bei Regenzeit durch großflächige Überflutungen Grundwasserbrunnen, Tankstellen und ein Kreiskrankenhaus. Das Messgebiet umfasst eine Fläche von 8 km<sup>2</sup>, welche mit Airborne-Laserscanning, terrestrischen Profilmessungen per RTK-GPS und Tachymetrie detailliert vermessen wurde. Der gesamte Höhenunterschied im Testgebiet umfasst nur wenige Meter, entlang des Bachverlaufes weit unter einem Meter. Der Bachverlauf ist gradlinig nach Süd-West ausgeprägt. Im südlichen Bereich verläuft der Bach durch eine historische Wallanlage und unter einer Kreisstraße hindurch. Beide Bereiche eignen sich zu planerischen Testzwecken einer künstlichen Barriere mit dem Hintergrund einer Wasserspeicherung auf Wiesen als Retentionsflächen.

#### 2.1 Existierende Daten

Die Behörden für Geoinformation, Landentwicklung und Liegenschaften (GLL) stellten für das Testgebiet die Geobasisdaten bereit. Aus diesen Daten wurde die Automatisierte Liegenschaftskarte (ALK) und das digitale Geländemodell (DGM 5) verwendet.

Es wurde das DGM 5 verwendet, weil es höhere Qualitätsansprüche erfüllt, da es aus Basis-Höhendaten besteht, bei denen zusätzlich geomorphologisch prägnante Informationen wie Gerippelinien berücksichtigt werden. Es wird in einer standardmäßigen Gitterweite von 12,5 m x 12,5 m berechnet und approximiert die Geländeoberfläche in zwei Genauigkeitsstufen. Bei der Stufe eins werden ausschließlich hochqualitative Höhendaten verwendet. Hier beträgt die durchschnittliche Abweichung der einzelnen Gitterpunkte zur tatsächlichen Geländeoberfläche weniger als +/- 0,5 m. In der Stufe 2 weisen die Gitterpunkte eine durchschnittliche Abweichung von +/- 1,5 m zur Geländeoberfläche auf. Diese Stufe wird in Gebieten verwendet, in denen die Erfassung von hochqualitativen Höhendaten weder topographisch noch wirtschaftlich sinnvoll ist, wie z. B. in Waldgebieten. Für diese Anwendung wurde die Genauigkeitsstufe eins verwendet, denn die Daten der Stufe 2 weisen eine unzureichende Höhengenauigkeit auf. (LGN 2006)

Für die Erstellung der Hochwassersimulation werden außerdem Klimadaten, Wasserstände, Rauhigkeiten und Fließhindernisse benötigt. Die Niederschlagsdaten konnten vom Wasserverband OOWV bezogen werden, wobei die Wasserstände aus Pegelaufzeichnungen gewonnen wurden.

#### 2.2 Akquirierte Daten

Der zweite Datensatz wurde durch eine Laserscannerbefliegung erfasst, die im Mai 2006 durchgeführt wurde (s. Abbildung 1). Hiermit wurden qualitativ hochwertige Daten gewonnen.

Das zu untersuchende Gebiet wurde in einer Flughöhe von 500 m beflogen. Insgesamt ergab sich dabei ein Datenvolumen von 3,51 GB bei 160 Mio. Laserpunkten, wobei durchschnittlich 17 Messpunkte auf einen Quadratmeter fallen.



Abbildung 1: Querschnitt durch die klassifizierten Laserdaten

Ergebnis der Befliegung ist eine dreidimensionale Punktwolke, wobei jeder Laserpunkt eine X/Y-Koordinate, sowie eine Höhe über Normal Null (NN) besitzt. Anschließend werden die Daten in weiteren Bearbeitungsschritten klassifiziert (Gebäude-, Boden- oder Vegetationspunkt) und ausgedünnt. Es resultieren sodann 4 Bodenpunkte auf einem Quadratmeter.

Da die Daten für ein vollständiges Geländemodell jedoch nicht ausreichen, wurden zusätzliche terrestrische Messungen durchgeführt. Die Sohle der Gräben wird durch die Laserscannerbefliegung nur unzureichend oder gar nicht erfasst, da der Laserstrahl nicht in das Wasser eindringt, sondern an der Oberfläche vollständig reflektiert wird. Deshalb wurden mehrere Längs- und Querprofile des Baches per RTK-GPS und Tachymetrie aufgenommen und für eine Vervollständigung der Geländeoberfläche den DGMen zugeführt.

#### 2.3 Datenanalyse

Aus den Punktdaten der Laserscanner-Befliegung und aus dem DGM5 wurde jeweils ein separates Geländemodell erzeugt. Diese Geländemodelle wurden miteinander verglichen und auf ihre Genauigkeit hin untersucht. Die Laserscannerdaten sind qualitativ sehr hochwertig, da 4 Bodenpunkte auf einem m<sup>2</sup> existieren. Diese Daten haben letztendlich eine Genauigkeit besser als +/- 10 cm in Lage und Höhe. Zudem sind die Bodenpunkte unregelmäßig über das gesamte Gebiet verteilt. In den Gebieten, in denen größere Geländeunterschiede herrschen, ist die Punktdichte größer als in weniger kupiertem Gelände. Dadurch lässt sich das Gelände durch die Bodenpunkte vollständig abbilden, da mit dieser Methode auch Kuppen, Senken und Böschungen präzise erfasst werden.

Die Punkte des DGM 5 haben eine geringere Dichte als die Laserscannerdaten. Hier kommt nur ein Bodenpunkt auf 156 m<sup>2</sup>. Zudem beträgt die Höhengenauigkeit +/- 50 cm. Die Geländepunkte liegen in einem sehr grobmaschigen Raster von 12,5 m \* 12,5 m vor. Durch die Interpolation der digitalisierten Punkte werden nur wenige Geländestrukturen, wie Kuppen, Senken, Straßen und Flüsse erfasst. Daher werden die Daten durch zusätzliche Gerippelinien und Geländekanten ergänzt. Jedoch reichen die Anzahl und der Umfang der Gerippelinien und Geländekanten für eine vollständige Geländenachbildung häufig nicht aus und wichtige Geländestrukturen gehen verloren. In dem Testgebiet wird der zu untersuchende Bachverlauf, von ca. 4 m Breite, nicht

abgebildet. Da die Daten der Laserscannerbefliegung wesentlich genauer sind, wird auch das hieraus erzeugte DGM genauer und bildet damit das Gelände wesentlich besser nach als das DGM 5. Besonders Straßen, Kuppen und Senken werden sehr genau modelliert und sogar Kleinstrukturen können interpretiert werden (s. Abbildung 2).



Abbildung 2: DGM aus Laserscannerdaten und DGM 5

# 3 Ergebnisse

#### 3.1 Simulationsvergleich zwischen der Detailaufnahme und dem DGM 5

Auf der Grundlage der DGMe aus den Laserdaten und dem DGM 5 wurden mehrere Simulationen erzeugt. Die Ergebnisse wurden miteinander verglichen und die Unterschiede zwischen dem DGM aus den Laserdaten und dem DGM 5 analysiert. Weiterhin wurde untersucht, in wie weit sich die Größe der Rasterzellen der DGMe auf die Überschwemmungsbereiche auswirken. Aus den Laserdaten wurde jeweils ein DGM mit einer Rasterweite von einen, vier und zehn Metern erstellt, da unterschiedliche Rastergrößen andere Auswirkungen auf die Simulation haben können (s. Abbildung 3). In dem DGM mit der Rasterweite von 10 ist die Kleine Norderbäke nur sehr unzureichend abgebildet. Der Verlauf ist gerade noch zu erkennen, jedoch ist die gesamte Geländenachbildung sehr grob. In dem DGM mit der Rastergröße von 4 ist das Gelände schon wesentlich genauer nachgebildet. Auch wird der Verlauf des Baches schon viel besser rekonstruiert, zudem ist er vollständig im DGM enthalten. In dem Rastermodell mit einer Zellengröße von eins werden die gesamten Geländestrukturen sehr präzise wiedergegeben.



Abbildung 3: Rastervergleich mit unterschiedlichen Zellengrößen eins, vier, zehn

Die Berechnung der Hochwassersimulation wurde mit der Methode Zuflussganglinie durchgeführt. Der Wasserzufluss wird dabei über eine externe Gangliniendatei (s. Abbildung 4) gesteuert, die aus verschiedenen Informationen erstellt wird. Die Ganglinie wird in eine Textdatei geschrieben, wobei für jedes Zeitintervall eine bestimmte Zuflussmenge gespeichert wird. Die Zuflussmenge wird durch eine Abflussganglinie bestimmt, die mit Hilfe des Einzugsgebietes, Pegelwerten und Niederschlagsdaten aufgestellt wird. Für die Abflussganglinie wird der Abfluss verwendet, der sich aus dem Produkt der Größe des Einzugsgebietes und der Abflussspende errechnen lässt. Das Einzugsgebiet für die Kleine Norderbäke hat eine Größe von 16,9 km<sup>2</sup>. Die Abflussspende kann aus der Kurve für das 100-jährige Hochwasser abgelesen werden. Die daraus erzeugte Ganglinie umfasst einen Gesamtzeitraum von 168 Stunden, genau 7 Tage. Nach 24 Stunden wird jeweils ein Raster mit den bis dahin überfluteten Flächen ausgegeben.



Abbildung 4: Verlauf der Ganglinie

Mit Hilfe von Volumenberechnungen, Differenzmodellen. Histogrammen und Oberflächenvergleichen wurden die Hochwassersimulationen ausgewertet. Wie zuvor dargelegt, ist das DGM aus den Laserdaten wesentlich genauer als das DGM 5. Dieser signifikante Unterschied macht sich auch in der Hochwassersimulation bemerkbar. Da das DGM 5 eine sehr glatte und ebene Geländeoberfläche hat, kann es deutlich weniger Wasser speichern, als das DGM aus den Laserdaten. Dieses ist dagegen viel rauer, strukturierter und die gesamte Geländestruktur ist viel unebener. Dadurch, dass hier u. a. kleinere Mulden und Senken modelliert werden, kann dieses Modell erheblich mehr Wasser speichern. Die Wassermassen auf dem DGM 5 breiten sich weiter aus als auf dem Laser-DGM (s. Abbildung 5). Mit Hilfe eines Differenzmodells, das aus den überschwemmten Flächen des letzten Tages gebildet wird, wurde dieser Sachverhalt deutlich gemacht. Beim DGM 5 sind aus dem Grunde mehr Gebäude einer möglichen Überflutungsgefahr ausgesetzt.



Abbildung 5: Überflutungsflächen auf dem DGM der Laserdaten (links) und auf dem DGM 5 (rechts)

#### 3.2 Szenarien planungstechnischer Maßnahmen

Auf Grundlage der berechneten Hochwassersimulationen können nun zu treffende Hochwasserschutzmaßnahmen auf ihre Wirksamkeit im Vorwege überprüft werden. Es können verschiedene Szenarien erprobt und ihre Wirkungsweisen untersucht werden. Eine mögliche Maßnahme wäre z. B. hinter der Kreisstraße 116 einen Damm mit einem Schott zu errichten, das bei einem drohenden Hochwasser geschlossen werden kann.

Zu Testzwecken wurden unterschiedliche Simulationen durchgeführt und deren Auswirkungen miteinander verglichen. In der Abbildung 6 werden die überfluteten Flächen mit und ohne Damm dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, wie das Wasser von dem Fließhindernis zurückgehalten wird. Das Wasser staut sich in diesem Bereich auf und vergrößert somit die Oberfläche der überfluteten Bereiche. Die Überschwemmungstiefen sind bei der Simulation mit einem Schott als Fließhindernis um ca. 10 cm tiefer. Bei dieser Baumaßnahme wären jedoch Gebäude im Norden einer möglichen Überschwemmungsgefahr ausgesetzt. Aber gerade hier liegt der große Vorteil einer jeden Simulation. Die geplanten Baumaßnahmen können bezüglich ihrer Lage und Dimensionierung und damit auf ihren Nutzen schon im Vorfelde genau untersucht werden.



Abbildung 6: überflutetes Gebiet ohne bauliche Schutzmaßnahme und mit Damm

# 4 Fazit

Die im Testgebiet durchgeführten Detailaufnahmen mittels Airborne-Laserscanning und terrestrischer Profilmessung spiegeln den aktuellen und präzisen Bestand der Topographie und Situation inklusive Kleinstformen wieder. Das daraus resultierende DGM erweist sich im Gegensatz zum DGM aus Geobasisdaten als ausreichende Grundlage für eine detaillierte Betrachtung von Hochwassersimulationen im Flachland. Der wesentliche Vorteil ergibt sich aus der Tatsache, dass bei höherem DGM-Detailgrad mehr Wasser aufgrund der erfassten Senken und Kuppen gespeichert werden kann und damit die Überschwemmungsflächen deutlich kleiner sind. Die Ausweisung von potentiellen Risikoflächen und möglichen Gegenmaßnahmen sind schlüssig, müssen sich jedoch noch in der Praxis bewahrheiten. Vergleiche der Simulationsergebnisse mit Luftbildern überschwemmter Gebiete, sowie Erfahrungsberichte mit ansässigen Personen wie z.B. Landwirten und Einsatzkräften sollen zur Verifizierung herangezogen werden. Im verbleibenden Zeitraum des Projekts wird verstärkt die Verfeinerung und Optimierung der Algorithmen und Ergebnisse vorangetrieben.

# 5 Literaturverzeichnis

- BILL, R.: Grundlagen der Geo-Informationssysteme, Hardware, Software und Daten. Band1, 4. Aufl. Heidelberg: Wichmann, 1999.
- BILL, R.: Grundlagen der Geo-Informationssysteme, Anwendungen und neue Entwicklungen. Band2, 2. Aufl. Heidelberg: Wichmann, 1999.
- FÜRST, J.: GIS in Hydrologie und Wasserwirtschaft. 1. Aufl. Heidelberg: Wichmann, 2004.
- GEOMER, RODRIGUEZ & ZEISLER: FloodArea, Anwender Handbuch manual-dt.pdf. Version 9.0, April 2005.
- LGN: Geodaten & Karten, http://www.lgn.niedersachsen.de/master/C8146883\_N8076 265\_L20\_D0\_I7746208.html (Stand 04.10.2006)
- NEBEL, K.: Aufbau eines Geoinformationssystems und Untersuchungen von digitalen Geländemodellen aus Laserscannerdaten für Hochwassersimulationen, Diplomarbeit, Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven, November 2006.

# Determination of urban land use based on airborne laser scanner and GIS data

# WOLFGANG WAGNER<sup>1</sup>, MARKUS HOLLAUS<sup>2</sup>, KLAUS STEINNOCHER<sup>3</sup> & CHRISTIAN HOFFMANN<sup>4</sup>

Abstract: The dynamic of urban sprawl represents a major challenge for regional and urban planners who search for reliable techniques and tools to monitor, describe and evaluate these processes. Available data sources (e.g. digital cadastral map, zoning plan) do not satisfy the needs of the growing demand for up-to-date geo-information. Different acquisition times and differences between the mapped land cover and the real land use restrict the application of these data for urban monitoring applications such as the dispersion of pollutants.

The presented work is part of the project Austrian Settlement & Alpine environment cluster for GMES – Cluster Settlement, which had the aim of defining, developing and consolidating an integrated EO based product/service portfolio providing geoinformation in the urban and settlement domain. The analyses were done for a 12 km<sup>2</sup> area located in the northern part of the city Linz, Austria. From airborne laser scanning (ALS) data a building block model was extracted using a Dempster-Shafer fusion approach. The derived building block model was used in combination with an IKONOS image to generate an improved urban structure product. For the extraction of the final land use information the derived urban structure product is combined with demographic data. The geo-coded HEROLD company and the ACGeo address data were used to assign the economic activity to each sub-building. Finally, this derived functional classification of sub-buildings was used to disaggregate census-based statistical population data using a dasymetric approach resulting in a population density map on a sub-building level.

Keywords: Airborne laser scanning; DTM; DSM; demographic data; building block model; urban land cover / use;

# 1 Introduction

The spatial development of urban areas, the dynamic of urban sprawl and suburbanisation causes increasing problems in terms of competing land use, private transport, infrastructure costs and environmental pressure. All these issues represent a major challenge for regional and urban planners who search for reliable techniques and tools to monitor, describe and evaluate these developments. Current monitoring processes rely mainly on statistical data from the census, on zoning plans, and on the digital cadastral map. While statistical data lack on spatial detail the latter are often not up-to-date and do not include information on actual land use. Therefore, the capturing of certain urban environmental conditions at specified times are hardly possible based on the mentioned information.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Wagner Wolfgang: Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, TU Vienna, Gußhausstraße 27-29, 1040 Vienna. ww@ipf.tuwien.ac.at

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Hollaus Markus: Christian Doppler Laboratory "Spatial data from laser scanning and remote sensing" at the Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, TU Vienna, Gußhausstraße 27-29, 1040 Vienna.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Steinnocher Klaus: Austrian Research Centers GmbH - ARC, Spatial Systems, Donau-City Str. 1, 1220 Vienna.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Hoffmann Christian: GeoVille GmbH, Museumsstr. 9-11, A-6020 Innsbruck.

MILLER and SMALL (2003) give an extensive review of studies which highlight potential applications of remote sensing for urban environments. Today, very high spatial resolution satellite data (e.g. IKONOS, OUICKBIRD) or aerial photos are commonly used to derive urban land cover maps. Even though object oriented approaches, using geometric, spectral, and textural information, achieve land cover classification with high accuracies it is not possible to determine land use categories directly from the spectral quantities. For example some objects like streets and roofs can be built of similar materials and can have similar surface characteristics and therefore, identical spectral reflectivity is observed. A major step towards the derivation of land use information from remotely sensed data was the involvement of object heights above the terrain surface. For example HAALA and WALTER (1999) used local height information derived from airborne laser scanner data in combination with multi-spectral imagery to separate buildings, trees, streets and grass-covered areas within an urban environment. ZHAN et al. (2002) propose to use the information of the spatial arrangement and the geometric properties (e.g. size, shape, orientation) of urban features (e.g. buildings, green space, water) for a land use classification. However, the discriminatory power of land use classes is limited with such methods. More sophisticated approaches to derive land use information use the land cover classification based on multi-spectral imagery in combination with available statistical census data and other available GIS data (e.g. zoning planes, cadastre). STEINNOCHER et al. (2005) disaggregate statistical population data to population density maps using building density maps derived from high resolution satellite imagery. Conclusions are that building density is a good proxy for population density but in urban centres, building height is required as well. One approach to derive building heights is the usage of airborne laser scanning (ALS) data, which has been established as the standard data source for the generation of high precision digital terrain models (DTM) during the last decade. Especially in urban environments the ALS technology has several advantages comparing to stereoscopic analysis of aerial images. ALS systems are characterised by a simple measurement geometry meaning that the 3D-position of a point on the surface is measured from one location. Thus, also for dense built-up areas with small streets precise topographic models can be generated and building models can be determined in an economic way. Unfortunately, the operational application of using ALS data and multi-spectral imagery in combination with statistical and geospatial data sets to derive land use information is limited until now.

The objectives of this paper are the description of how building block models can be derived from ALS data and how they can be combined with demographic data (e.g. statistical data form the Austrian census, zoning plans from the administration of Upper Austria, geo-coded company data and building addresses provided by a geo-marketing company) to generate upto-date urban structures and functions.

# 2 Study area and data

The test site Linz-Urfahr covers the northern part of the city Linz, which is the capital of the federal province of Upper Austria. With approximately 191,000 inhabitants Linz is behind Vienna and Graz the third largest city in Austria. This 12 km<sup>2</sup> large test site includes urban and sub-urban environments as shown in Figure 1. In addition to ALS data an *IKONOS* image and several statistical and geospatial data were available.

The ALS data were acquired in the framework of a commercial terrain mapping project. The flight campaign took place on March 24, 2003 under leaf-off and snow free conditions and was accomplished by the company TopScan, Germany, which employed first/last pulse Airborne Laser Terrain Mapper (ALTM) system. The average flying height above ground was 1,000 m, the overlap between flight strips was about 50%, and the pulse repetition rate was 25 kHz. Consequently, the average point density is 1 point per m<sup>2</sup>. The maximum scan angle was  $\pm 20$  deg, resulting in an average swath width of about 725 m. The beam divergence of the ALTM system is 0.3 mrad. The 3D-point clouds were geo-referenced based on the methods describe in KAGER (2004). A short description of the derivation of the topographic models i.e. digital terrain model (DTM), digital surface model (DSM), and difference models (nDSM) is given in section 3.



Figure 1: Left: Location of the test site Linz-Urfahr in Upper Austria. The coordinates are in the local Gauß-Krüger (reference meridian M31) coordinate system. As background image the ÖK500 is shown, © BEV – Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen. Right: Shaded digital surface model combined with coloured terrain heights.

The available zoning plans are defined by the Upper Austrian Land Use Planning law that regulates the process of organizing the use of lands and their resources to best meet people's needs over time, according to the land's capabilities. Zoning plans differentiate between building land, transport areas, and green areas. Areas dedicated as building land have to be appropriate for the construction of buildings in terms of infrastructure and natural conditions, excluding areas of natural risk. Areas dedicated to transport should serve the needs of traffic including associated land. All other areas are to be defined as green areas. Building land is subdivided in the several categories i.e. residential, industrial, mixed, pure commercial areas. Socio-economic data were acquired from *Statistik Austria*<sup>5</sup> during the last census in 2001. The census is based on a questionnaire regarding demographic and job-related characteristics of each citizen of Austria. According to regulations for data privacy the information is only provided on aggregated spatial level in order to avoid conclusions about single persons. For regional analyses the data are aggregated to census tracts that typically correspond to administrative units containing 1,000 inhabitants in average. An alternative to census tracts is the raster representation (e.g. grid size of 250x250 m) of statistical data, representing much better the actual spatial distribution of the population.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> <u>http://www.statistik.at/gz/uebersichtsdaten.shtml</u>

Company data used in this project are taken from *ARCData/HEROLD Firmendaten*, a data base containing geo-coded company information that is updated twice a year. The product includes basic information on companies such as name, economic sector, and address. The geo-coding is based on the street network of *Tele Atlas*<sup>6</sup>, whereas within the street sectors the locations of the addresses are interpolated proportionally. Differentiation of the side of the street is only provided for major roads. Where detailed address information is missing the geo-coding is based on street sectors, cities or census tracts.

The *ACGeo* data consist of postal addresses linked with precise geo-coordinates. The location of the points is either the building or the entrance of the building with the corresponding address. The data are collected by the Post AG, the leading mail service in Austria, based on digitising of orthophotos and are updated twice a year. Therefore, the geocoding quality of the *ACGeo* data is significantly higher than that of the *HEROLD* company data. Each record of the *ACGeo* data set consists of the postal certified address code, zip code, city name, street name, house number, coordinates, and quality code. An overview of the used statistical and geo-spatial data sets is shown in Figure 2.



Figure 2: Statistical and geo-spatial data used for the estimation of urban function products. Left: Generalized zoning plan, middle: Population per grid cell from the census 2001, and right: ACGeo address data.

# 3 Derivation of building block models from ALS data

Airborne laser scanning data are commonly in use to derive topographic models like digital terrain models (DTM), digital surface models (DSM), and normalised digital surface models (nDSM). The DTM describes the elevation of the ground surface, whereas the DSM represents the topmost surface which can be seen from the aeroplane. According to PFEIFER (2003) the elevation of the DSM in open areas like streets, agricultural fields without vegetation, grassland with short vegetation, or areas with bare soil is equivalent with the elevation of the DTM. For buildings the DSM describes the roofs whereas the DTM describes the terrain without buildings. In forested areas the DTM represents the ground surface and the DSM the elevation of the top most canopy surface. For the generation of the DTM the observed ALS last-echo points must be classified in terrain and off-terrain points, which is commonly referred to as filtering (KRAUS and PFEIFER, 1998). This is not a simple task because current ALS systems provide only geometric information from targets, which were in the laser beam path. Due to the missing semantic information it is unknown where the recorded echoes are coming from. Therefore, physically based approaches are not feasible. This necessitates the use of statistical approaches that model, in some way or other,

<sup>6</sup> http://www.teleatlas.com .

the spatial relationship of the points. With novel ALS systems, which record the fullwaveform of the backscattered echoes, it is possible to provide additional, more physically based criteria (e.g. amplitude, echo width, backscatter cross-section) for the classification of the ALS points (WAGNER et al., 2006).

For this project the widely-tested hierarchic robust filtering technique described in KRAUS and PFEIFER (1998), PFEIFER et al. (1998) and BRIESE et al. (2002) has been employed to generate the DTM. In the first run, an average surface of thinned out last-echo points is calculated, whereas all used points have the same weight. It is expected that the true terrain points have negative residuals, while the vegetation points have small negative or positive residuals. In a next calculation step these residuals are used to compute weights ranging between 0 and 1 for each laser point. These weight functions give high weights to ground points and low weights to vegetation points. Details about these weight functions can be found in PFEIFER et al. (1998). Considering the calculated weights a new surface is calculated. Finally, in an iterative process the mentioned calculation steps are repeated using for each step a higher point density. Comprehensive information about the performance of this hierarchic robust filtering approach in comparison with several other available approaches can be found in SITHOLE and VOSSELMAN (2004). While this is a computationally demanding task, the DSM is quickly generated by using a moving planes interpolation of the highest first-pulse points within a pre-defined grid of one meter. The moving planes interpolation fits tilted planes into the eight nearest first-echo points by using a least square approach. Furthermore, the heights are weighted inversely proportional to the distance from the grid point. Both methods are implemented in the commercial software package  $Scop++^{7}$ . A typical subsequent product from a DTM and a DSM is a so called normalised digital surface model (nDSM) calculated by subtracting the DTM from the DSM. The nDSM mainly contains height information of buildings, trees, and other vegetation as can be seen in Figure 3. In addition to the nDSM a difference model between first- and the last-echoes ( $\Delta H_{\rm FI}$ ) was calculated. In a first processing step the difference between the first- and the last-echo was calculated for each laser shot. Finally, these differences were used to generate the  $\Delta H_{\rm FL}$ model using the moving planes interpolation. In comparison to the nDSM this  $\Delta H_{FL}$ -model has the height zero for building areas. For forested areas the heights are quite similar to the nDSM heights as can be seen in Figure 3. The grid size for all calculated models is one meter. The derivation of the building block model from the ALS data can be divided into two processing steps, the detection of building footprints and the calculation of average building heights. Within this project the generation of the building footprints is based on the Dempster-Shafer method described in ROTTENSTEINER et al. (2005) and ROTTENSTEINER and BRIESE (2002). As shown in Figure 3 the input data for this method are the DTM, DSM, nDSM,  $\Delta H_{\rm FL}$ -model, and the surfaces roughness parameters (strength and directness of surface roughness), which are estimated from the normal vectors of the DSM. Based on the Dempster-Shafer fusion these input data are used to derive the land cover classes buildings, trees, grass land, and bare soil. Morphologic filters are used to eliminate small building areas (<20 m<sup>2</sup>) and the remaining connected building pixels are merged, resulting in initial building regions. The final building layer is derived using a second Dempster-Shafer fusion process based on the averaged input parameters.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> <u>http://www.ipf.tuwien.ac.at/products; http://www.inpho.de</u>



Figure 3: Input data for the classification of building area using the Dempster-Shafer method. left: Normalised digital surface model (nDSM), Middle: Difference model between first- and last-echo ( $\Delta H_{FL}$ ), and right: Roughness of the DSM.

The estimation of building heights can be done based on either the 3D points itself or the nDSM. The latter has the disadvantage of introducing smoothing effects but has the advantage of shorter execution times. For the current study the 3D first-echo points and the DTM were used to estimate the building heights. For each building the minimum terrain height is determined and all first-echo points are selected, which are located within the building footprint. After eliminating vegetation points (e.g. from overlapping trees) and points from constructions on the roof (e.g. chimney, roof antenna, power line, etc.) the building height is assigned to the median of all remaining point heights. Combining the derived building footprints and the estimated building heights a building block model can be generated as shown in Figure 4.



Figure 4: 3D view of the generated building block model for the test site Linz-Urfahr.

# 4 Determination of urban land use

The determination of urban land use maps, representing up-to-date urban structures and functions, requires the combination of detailed land cover maps and demographic data. Starting point of the functional classification is the 3D-building model, which provides information on the location, size and height of the single buildings. General information on the use of buildings can be obtained by introducing zoning data. Based on the complementary information provided by the *IKONOS* image and the ALS elevation data in combination with the zoning plan different spatial configurations, patterns and densities of sub-urban zones are

used to differentiate between building types within residential, industrial, commercial, recreational, and mixed areas. Due to the high spatial resolution of the remotely sensed data sets and their different properties, an object-oriented classification approach, based on the software eCogntion<sup>8</sup>, was applied. The introduction of the zoning plans gives an indication of the dominant use of single buildings but does not take into account local variations.

In order to allow a functional classification of buildings geo-coded *HEROLD* company data are integrated in the process. Unfortunately a part of this data had a low positional accuracy and therefore had to be corrected using ancillary data. In the current project the *ACGeo* address data are used as reference data. Their positional accuracy is very high, and most addresses can be assigned to one building without ambiguity. The matching of these two data sets was performed by the postal address. Although the postal address represents an identical content, there might be still differences in the entries, most of which can be corrected automatically, the remaining to be adapted manually. Within the test site more than 97% of the company records could be geo-coded automatically using this address matching approach. However, as one building. In order to produce a unique relationship between addresses and building objects, buildings with more than one address need to be divided into subbuildings. This task is achieved by generating Thiessen polygons around the address points and intersecting the resulting polygons with the buildings.

Based on the derived sub-building model and their linked company information it is possible to assign economic activities to sub-buildings. Assuming that the company data base is complete it is likely that the remaining sub-buildings are used for pure residential purpose, which agrees with the original zoning plan information. As the company data includes the company name, the economic sector and the economic sector group a refined functional classification of sub-buildings is possible, resulting in a real land use classification. However, the reliability of this classification is highly depending on the quality and completeness of both data sets. Figure 5 (left) shows a subset of the final land use classification.

Finally, the derived urban land use information is used for an improved spatial distribution of the statistical census data, which are available for grids with a cell size of 250x250 m. As described in STEINNOCHER et al. (2006) the housing density can be applied as a proxy for spatial disaggregation of population data. Instead of a 2D housing density extracted from remote sensing data the derived land use information, as described above, is used for the current project. Therefore, for each grid cell the total volume of all sub-buildings is related to the population data from the census. Based on the functional classification of sub-buildings weighing factors are introduced, depending on the number of non-residential entries within a grid cell. Figure 5 (right) shows the disaggregated population per sub-building represented by the height of the building. Consequently urban blocks stick out extremely while the uninhabited buildings stay flat.

According to regulations for data privacy the validation of the disaggregated population per sub-building could only be done by the *Statistik Austria*. The validation shows that 16% of the disaggregated population per sub-building has no deviation and 60% has a deviation between one to five inhabitants per sub-building. This means that for more than three quarters of the entries the estimated population differs from the reference data by less than five persons.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> www.definiens-imaging.com



Figure 5. left: Functional classification of buildings; right: 3d view of the disaggregated population density. The building height represents the population per sub-building.

# 5 Summary and conclusion

Classification of urban and suburban features using very high resolution remote sensing data is a challenging task due to the complexity of the urban environment. The involvement of ancillary height information (e.g. derived from ALS data) not only improves the separation of roads and buildings as well as different types of vegetation but can also be used to add the third dimension to the land cover map resulting in an urban structure product. For the derivation of land use information the urban structure product was extended by the function of buildings. The geo-coded *HEROLD* company data and *ACGeo* address data were used to assign the economic activity to each sub-building. Therefore, it was possible to classify the function of sub-buildings, resulting in a real land use classification. Finally the derived land use information was used to disaggregate census-based statistical population data using a dasymetric approach.

Summing up it can be said that the integration of remote sensing and airborne laser scanner data with socio-economic information is a valuable basis to derive detailed structural and morphological properties of complex urban environments on a sub-building level. The disaggregation of population on a sub-building level benefits from two innovations: first the introduction of the building height and second the location of economic activities. With the former the volume of buildings can be calculated and thus a better proxy for the number of inhabitants per building is provided. The latter leads to an actual land use model, restricting the population to only those sub-buildings that are of residential use.

# 6 Acknowledgements

This work is part of the project Austrian Settlement & Alpine environment cluster for GMES – Cluster Settlement, funded by the Austrian Space Programme (ASAP-CO-205/05). Basic research problems in airborne laser scanning were investigated within the Christian Doppler Laboratory "Spatial data from laser scanning and remote sensing" at the Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, TU Vienna. The airborne laser scanner data was provided by the Geoinformation und Liegenschaft Department of the Federal State Government of Upper Austria.

# 7 References

- BRIESE, C., PFEIFER, N. AND DORNINGER, P., 2002: Applications of the Robust Interpolation for DTM Determination. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXIV (Part 3A), 55-61.
- HAALA, N. AND WALTER, V., 1999: Automatic Classification of Urban Environments for Database Revision using LIDAR and Color Aerial Imagery. In: (Eds.): International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 3-4 June, 1999, Vol. 32, Part 7-4-3 W6, Valladolid, Spain, 7.
- KAGER, H., 2004: Discrepancies between overlapping laser scanner strips simultaneous fitting of aerial laser scanner strips. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXV (Part B/1), 555-560.
- KRAUS, K. AND PFEIFER, N., 1998: Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 53 (4), 193-203.
- MILLER, R.B. AND SMALL, C., 2003: Cities from space: potential applications of remote sensing in urban environment research and policy. Environmental Science & Policy 6, 129-137.
- PFEIFER, N., 2003: Oberflächenmodelle aus Laserdaten. Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation (VGI) Heft 4/2003, 243-252.
- PFEIFER, N., KÖSTLI, A. AND KRAUS, K., 1998: Interpolation and Filtering of Laser Scanner Data - Implementation and First Results. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXII (Part 3/1), 153-159.
- ROTTENSTEINER, F. AND BRIESE, C., 2002: A New Method for Building Extraction in Urban Areas from High-Resolution LIDAR Data. In: (Eds.): Photogrammetric Computer Vision (PCV'02), ISPRS Commission III, Symposium 2002, 9-13 September, Graz, Austria, 6.
- ROTTENSTEINER, F., TRINDER, J., CLODE, S. AND KUBIK, K., 2005: Using the Dempster-Shafer Method for the Fusion of LIDAR Data and Multi-spectral Images for Building Detection. Information Fusion 6 (4), 283-300.
- SITHOLE, G. AND VOSSELMAN, G., 2004: Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 59 (1-2), 85-101.
- STEINNOCHER, K., PETRINI-MONTEFERRI, F., TÖTZER, T. AND WEICHSELBAUM, J., 2005: Räumliche Disaggregation von sozio-ökonomischen Daten. In: J. Strobl, T. Blaschke and G. Griesebner (Eds.): Angewandte Geographische Informationsverarbeitung, XVII, Salzburg, 702-707.
- STEINNOCHER, K., WEICHSELBAUM, J. AND KÖSTL, M., 2006: Linking remote sensing and demographic analysis in urbanised areas. In: P. Hostert, A. Damm and S. Schiefer (Eds.): First Workshop of the EARSeL SIG on Urban Remote Sensing "Challenges and Solutions", Berlin, March 2-3, 2006, CD-ROM.
- WAGNER, W., ULLRICH, A., DUCIC, V., MELZER, T. AND STUDNICKA, N., 2006: Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 60 (2), 100-112.
- ZHAN, Q., MOLENAAR, M. AND TEMPFLI, K., 2002: Hierarchical Image Object-Based Structural Analysis toward Urban Land Use Classification Using High-Resolution Imagery and Airborne Lidar Data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 33, Part 7, 1751-1758.

# Statusbericht zur Standardisierung für Photogrammetrie und Fernerkundung

### Wolfgang Kresse<sup>1</sup>

Abstract: This report summarizes the activities of international standardization organizations in the past year.

The ISO/TC 211 "Geographic information / Geomatics" forwarded the ISO 19115 "Metadata – Part 2: Imagery and gridded data" to the DIS-stage (Draft International Standard). The discussion about the introduction of the meta-meta-concept ebRIM (Electronic Business Registry Information Model) for an integration of the individual ISO metadata-standards, e.g. ISO 19115 and ISO 19119, has started.

The Open Geospatial Consortium closed the request-stage for most of the components of the Sensor Web Enablement, e.g. the Sensor Model Language. A number of discussion papers related to the handling of Earth Observation data have been published.

Research in future fields of standardization is ongoing within the ISPRS and the EuroSDR. The topics include "Direct Georeferencing" and "Calibration of Digital Aerial Cameras".

# 1 Einleitung

Der folgende Bericht schreibt die Beiträge der vergangenen Jahre fort und berücksichtigt Dokumente und Entscheidungen zu Normen und Standards für Photogrammetrie und Fernerkundung seit Beginn des Jahre 2006. Vom ISO/TC 211 ist diesmal wenig zu berichten. Die meisten Neuerungen hat das Open Geospatial Consortium veröffentlicht. GEOSS ist ein intensiver Nutzer der Fernerkundung sowie der geodätischen Grundlagen. Die ISPRS und das EuroSDR arbeiten an Forschungsprojekten, die zu künftigen Normen und Standards weiterentwickelt werden können.

# 2 ISO

Die Arbeiten an den ISO-Normen schritten im vergangenen Jahr etwas langsamer voran, weil die Herbstplenarsitzung des ISO/TC 211 "Geographic information / Geomatics" in Riad, Saudi Arabien, relativ schwach und seitens der USA fast gar nicht besucht war. Hinzu kam die Streichung des Normungsprojektes ISO 19130 "Sensor data models for imagery and gridded data" wegen Überschreitens der Fünfjahresfrist im März 2006. Eine Bewegung in allen Projekten ist bei der Plenarsitzung in Rom im Mai 2007 zu erwarten.

Die Situation bei den Normen für Photogrammetrie und Fernerkundung stellt sich wie folgt dar: Die ISO 19115-2 "Metadata – Part 2: Extension for imagery and gridded data" hat alle fachlichen Hürden genommen und wird daher nach Ablauf eines formal festgelegten Zeitplans zur internationalen Norm. Viele Metadaten, z.B. bezüglich des Bildfluges, finden

sich in dieser Norm wieder. Die ISO 19101-2 "Reference model – Part 2: Imagery" wurde zwar kürzlich mit ausreichender Mehrheit bestätigt, allerdings ohne das positive Votum der USA. Erfahrungsgemäß haben internationale Normen eine geringe Aussicht auf Erfolg, wenn die USA die Unterstützung versagen, zumal in diesem Fall der Projektleiter Amerikaner war. Die ISO 19130 "Sensor data models for imagery and gridded data" wird in Rom neu gestartet.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Prof. Dr. Wolfgang Kresse, Hochschule Neubrandenburg, Postfach 110121, 17041 Neubrandenburg, Tel. 0395/5693-355, Fax 0395/5693-399, kresse@hs-nb.de
Die Details waren zum Redaktionsschluss dieser Veröffentlichung allerdings noch nicht bekannt.

Seit die ISO 19115 "Metadata" vor knapp fünf Jahren veröffentlicht wurde, haben weltweit viele Stellen die Regelungen für ihre Anwendungen umgesetzt. Daher ist die Unruhe groß, seit bekannt ist, dass ein neues Konzept eine ganze Reihe von bisher separat entwickelten Normen integrieren soll. Es handelt sich um die "Electronic Business Extensible Markup Language (ebXML)" der OASIS Standardisierungsorganisation. Die ebXML wird auch ebRIM oder RIM genannt (RIM für "Registry Information Model").

Dieses oft als Meta-Meta-Modell bezeichnete ebRIM-Konzept wird vermutlich vom ISO/TC 211 zur Norm erhoben, nachdem sich das OGC bereits dafür ausgesprochen hat. Das ebRIM integriert sowohl Katalog- als auch Registrierungsdienste. Die folgende Liste zeigt jene ISO-Normen, in denen Anpassungen mindestens erforderlich sein werden:

```
ISO 19110 "Methodology for feature cataloguing"
ISO 19115 "Metadata"
ISO 19115-2 "Metadata – Part 2: Extension for imagery and gridded data"
ISO 19117 "Portrayal"
ISO 19119 "Services"
ISO 19135 "Registry"
```

# 3 OGC

Die Aktivitäten des Open Geospatial Consortium seit Anfang 2006 lassen sich im Wesentlichen in fünf Kategorien einteilen:

```
Sensor Web Enablement (SWE)
Earth Observation (EO)
Web
Geospatial Digital Rights Management Reference Model (GeoDRM RM)
Catalogues
```

Das SWE beinhaltet konzeptionell einen fast-online Internetzugriff auf weltweit verteilte Sensoren aller Art. Neben den Systemen der Photogrammetrie und Fernerkundung werden Webcams, Thermometer, Windmesser, Druckmesser, Dehnmessstreifen (Bauwerksmonitoring) und viele andere Sensorarten angesprochen.

Die wesentlichen Komponenten des SWE standen als "Request for Public Comment" (RFPC) zur Diskussion. Zurzeit werden die OGC-internen Kommentare ausgewertet und vor der Verabschiedung als Implementation Specification in die Dokumente eingearbeitet. Die Sensor Model Language (SensorML) liefert sowohl ein Sensormodell als auch die zugehörige Umsetzung in ein XML-Schema und beinhaltet auch einige grundlegende Parameter für die Georeferenzierung photogrammetrischer und fernerkundlicher Daten. Die Transducer Markup Language (TML) dagegen beschreibt eine im Umfeld des amerikanischen Militärs eingeführte Firmenlösung. Die übrigen Service, und können im Detail über die Homepage des Open Geospatial Consortium gelesen werden.

Das OGC hat die Entwicklung von Spezifikationen für Fernerkundungsdaten auf breiter Front begonnen. Die Projekte konkretisieren die Georeferenzierung, Klassifizierung, die Metadaten, die Verbindung von Vektor- und Rasterdaten, die Zugriffsrechte sowie die Behandlung fernerkundlicher Daten im Internet.

Georeferenzierung	Image Geopositioning Service, Version 0.0.0 (DP)	
Klassifizierung	Web Image Classification Service (WICS), Version 0.3.3 (DP)	
Metadaten	Imagery Metadata, Version 1.0 (DP)	
	GML 3.2 Image Geopositioning Metadata Application Schema,	
	Version 0.0.0 (DP)	
Vektor- und Rasterdaten	GML Application Schema for EO Products (0.1.4) (DP)	
Zugriffsrechte	EO Products Extension Package for ebRIM (ISO/TS 15000-3)	
-	Profile for CSW 2.0, Version 0.0.3 (DP)	
Internet	Web Map Service - Application Profile for EO Products, Version	
	0.1.0 (DP)	
DP = Discussion Paper		
EO = Earth Observation		
CSW = Catalog Service f	or Web	

Die genannten Projekte befinden sich alle noch in dem frühen Stadium des "Discussion Papers". Allerdings lohnt sich schon jetzt ein Blick in die im Internet sichtbaren Dokumente, denn in vielen Fällen ist der bisher beteiligte Autorenkreis recht klein.

Die weit verbreiteten OGC Web Services wurden im vergangenen Jahr alle als Implementation Specifications (Im. Sp.) verabschiedet:

Web Service Common, Version 1.1.0 (Im. Sp.) Web Map Service (WMS), Version 1.3.0 (Im. Sp.) Web Feature Service (WFS) Implementation Specification Corrigendum, Version 1.0.0 (Im. Sp. C.) Web Coverage Service (WCS), Version 1.1.0 (Im. Sp.)

Diese Standards wurden inzwischen an die Normungsgremien der ISO weitergeleitet.

Das OGC arbeitet des Weiteren an einer Verallgemeinerung der Metadatenstandards, an einer Erweiterung der bisherigen Modelle zum rechtlichen Schutz digitaler Daten auf den Bereich der Geoinformation und an den Katalogdiensten.

Im OGC arbeiten nur wenige Vertreten der Photogrammetrie aktiv mit. Daher sind die Spezifikationen und die vorbereitenden Dokumente (Discussion Paper usw.) stark von der Fernerkundung geprägt. Es wäre wünschenswert, wenn die Jahrzehnte langen Erfahrungen der Photogrammeter noch stärker beim OGC zur Geltung gebracht werden könnten.

# 4 GEOSS

Das internationale Projekt "Global Earth Observation System of Systems" (GEOSS) wird von der multinationalen "Group on Earth Observations" (GEO) gestaltet. Das Projektziel ist die Erhebung, Modellierung und Verteilung von Daten des Systems Erde, um Vorhersagen und Entscheidungshilfen präziser als bisher liefern zu können.

Bei der Konferenz der GEO im letzten Herbst (GEO III, Bonn, November 2006) wurde der Arbeitsplan turnusmäßig fortgeschrieben (Workplan 2007-2009). Viele der etwa 70 Aufgaben (Tasks) haben eine mehr oder weniger ausgeprägte Beziehung zu Photogrammetrie und Fernerkundung und sind in der folgenden Tabelle aufgelistet. In einigen Fällen wird eine Verbindung zum Open Geospatial Consortium deutlich. Die mit "06" gekennzeichneten Aufgaben wurden vom bisherigen Workplan übernommen. Die mit "07" gekennzeichneten Aufgaben wurden bei der GEO III Konferenz neu definiert.

Insgesamt spielen Photogrammetrie und Fernerkundung bei den Aufgaben von GEOSS eine Nebenrolle und dienen eher als technische Unterstützung für andere Arbeitsfelder.

Disasters	DI-06-03:	Integration of InSAR Technology
	DI-06-09:	Use of Satellites for Risk Management
Climate	CL-06-02:	Key Climate Data from Satellite Systems
Water	WA-07-02:	Satellite Water Quantity Measurement and Integration with
		In-situ Data
Ecosystems	EC-07-01:	Global Ecosystem Observation and Monitoring Network
Architecture	AR-06-09:	High Resolution Multispectral Imager Continuity
	AR-07-03:	Global Geodetic Reference Frames
Data Management	DA-06-04:	Data, Metadata and Products Harmonisation
-	DA-06-05:	Guidance Document for Basic Geographic Data
	DA-07-01:	DEM Interoperability
	DA-07-04:	Sensor Web Enablement for In-Situ Observing Network
		Facilitation

## 5 Weitere Aktivitäten

In einigen anderen Fachorganisationen wird zurzeit intensiv an den Grundlagen für künftige Normen und Standards gearbeitet, insbesondere in der ISPRS und in EuroSDR. Als wichtigste Projekte, deren Entwicklungsstand für eine Normung noch nicht reif ist, könnte man die Folgenden nennen:

Zuverlässigkeit der direkten Georeferenzierung auf der Basis von GPS und INS Kalibrierung von Digitalen Luftbildkameras Zertifizierung von Digitalen Luftbildkameras Validierung (Qualitätprüfung u.a.) von Fernerkundungsdaten

## 6 Zusammenfassung

Von der ISO ist vor allem die Fertigstellung der Metadatennorm für Bilddaten und der Beginn der Diskussion über das Meta-Meta-Konzept ebRIM zu berichten. Das OGC arbeitet unter anderem am Sensor Web Enablement und an der Integration von Fernerkundungsdaten. Bei GEOSS stehen Photogrammetrie und Fernerkundung zurzeit eher am Rande. ISPRS und EuroSDR legen die Grundlagen für Normen und Standards zur direkten Georeferenzierung und zur Kalibrierung von Digitalen Luftbildkameras.

# 7 Literaturverzeichnis

Botts, M. (2005): "Sensor Model Language (SensorML) Implementation Specification", Version 1.0, OGC 05-086

Group on Earth Observation (GEO) (2007): GEO 2007 – 2009 Workplan, Version 4 ISO/CD 19101-2 (2007): "2. Draft Technical Specification 19101-2 Geographic information – Reference model – Part 2: Imagery", ISO/Technical Committee 211, document N 2149

ISO/CD 19115-2 (2007): "Text for final CD 19115-2 Geographic information – Metadata – Part 2: Metadata for imagery and gridded data", ISO/Technical Committee 211, document N 2171 Ad hoc group on the study of ebXML RIM (2007): "The applicability of ebXML RIM and advise to the committee according to resolution 358 from Riyadh", ISO/Technical Committee 211, document N 2165

Internetseiten:

EuroSDR: <http://www.eurosdr.net/2002/index.htm> GEOSS: <http://www.earthobservations.org/about/about\_GEO.html> ISO/TC 211: <http://www.isotc211.org/> ISPRS: <http://www.isprs.org/> Open Geospatial Consortium: <http://www.opengeospatial.org/>

# Überlegungen zur Software-Zertifizierung in der Nahbereichsphotogrammetrie

### Heidi Hastedt<sup>1</sup>, Thomas Luhmann<sup>1</sup>, Jürgen Peipe<sup>2</sup> & Werner Tecklenburg<sup>1</sup>

Zusammenfassung: In diesem Beitrag werden Überlegungen zur Software-Zertifizierung in der Nahbereichsphotogrammetrie vorgestellt. Zunächst werden erste Erfahrungen bei der Auswahl geeigneter Datensätze, deren Parametrisierung und Generierung erläutert. Zudem werden die Ergebnisse der Verifikation dieser Daten präsentiert. Über die Auswertung einer im Januar 2007 durchgeführten Fragebogenaktion zur Akzeptanz der Idee einer Software-Zertifizierung sowie zur Datenbereitstellung und deren Ablauf wird berichtet. Der Beitrag soll als Grundlage einer Diskussion zum Thema Software-Zertifizierung in der Nahbereichsphotogrammetrie dienen.

## 1 Einleitung

Eine Vielzahl von Software-Paketen zur Bündelausgleichung für Anwendungen im Nahbereich ist heutzutage auf dem Markt erhältlich. Jeder Systemhersteller implementiert seine Algorithmen auf unterschiedliche Weise und mit unterschiedlichen Methoden in ein komplexes Softwarepaket. Je nach Programm stehen dem Anwender unterschiedliche Eingriffsmöglichkeiten und Systemeinstellungen zur Verfügung, die zu unterschiedlichen Resultaten führen können. Die Ergebnisse für den 3D-Objektraum beispielsweise können anhand kalibrierter Solllängen zwar auf ihre absolute Genauigkeit hin getestet werden, eine vollständige Überprüfung des funktionalen Modells ist damit jedoch nicht unbedingt verbunden. Eine Zertifizierung der Software-Pakete ist daher für Nutzer, aber auch für Systemhersteller von Bedeutung und kann einen Beitrag zur Steigerung der Akzeptanz der photogrammetrischen Messtechnik leisten.

Zum Vergleich von Kalibrier- und Objektraumergebnissen, die mit verschiedenen Bündelausgleichungsprogrammen erhalten wurden, liegen bereits einige Untersuchungen vor (PEIPE & TECKLENBURG 2006; REMONDINO & FRASER 2006; LUHMANN et al. 2006). Die in diesem Beitrag vorgestellten Überlegungen sollen unterschiedliche Anstrengungen vereinen und zu einer Zertifizierungsgrundlage mit dem Ziel allgemeiner Akzeptanz führen. Zunächst werden fehlerfreie Datensätze und deren Verarbeitung vorgestellt. Weiterhin werden die Ergebnisse der Auswertung eines Fragebogens zum Thema Software-Zertifizierung, der im Januar 2007 bei den Oldenburger 3D Tagen ausgegeben wurde, mitgeteilt (siehe HASTEDT et al. 2007).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Heidi Hastedt, Thomas Luhmann, Werner Tecklenburg: Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven, Institut f
ür Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik, Ofener Str. 16/19, D-26121 Oldenburg

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Jürgen Peipe: Universität der Bundeswehr München, Institut für Photogrammetrie und Kartographie, Werner-Heisenberg-Weg 39, D-85577 Neubiberg

## 2 Entwurf der Grunddatensätze

Zur Generierung fehlerfreier Datensätze sind im Wesentlichen zwei Wege denkbar: Die vollständige synthetische Erzeugung oder die Simulation eines Datensatzes, der auf einem realen Datensatz basiert (EL-HAKIM et al. 2003, HASTEDT et al. 2005). Vorteil des letzteren Verfahrens ist die Möglichkeit, Aspekte realer Situationen berücksichtigen zu können, die bei rein synthetischen Daten nicht miteinbezogen werden könnten.

Als Beobachtungen sind die Bildkoordinaten Grundlage für jede Bündelausgleichung. Hinzu kommen bekannte oder genäherte Informationen für die innere und äußere Orientierung der Kamera, Informationen über den Objektraum sowie eventuell Passinformationen. Basierend auf realen Datensätzen von Kamera-Kalibrierungen werden fehlerfreie Datensätze gebildet und untersucht.

Bei diesem Verfahren der Datengenerierung (Abb. 1) werden die äußeren und inneren Orientierungen sowie die Objektpunkte als feste Informationen angenommen. Die zugehörigen fehlerfreien Bildkoordinaten werden, abhängig von ihrer realen Sichtbarkeit in den einzelnen Bildern, die aus der realen Bildkoordinatendatei ableitbar ist, aus den Solldaten berechnet. Der Datengenerierung liegen die Kollinearitätsbedingungen zu Grunde (LUHMANN 2003). Die innere Orientierung der Kamera wird mit c,  $x_0'$ ,  $y_0'$  und Bildfehler beschreibenden Funktionen eingeführt (Parameter A1, A2, A3 für die radial-symmetrische Verzeichnung (balancierte Form), Parameter B1, B2 für die tangentiale Verzeichnung).



Abb. 1: Datengenerierung aus realen Datensätzen

In einem nächsten Schritt können Variationen der Grunddatensätze eingeführt werden (z.B. mit instabiler innerer Orientierung, Messunsicherheiten, groben Fehlern...; HASTEDT et al. 2004).

### 2.1 3D-Datensatz

Grundlage bildet hier ein Kalibrierungsdatensatz an einem Prüfkörper nach VDI 2634, aufgenommen mit einer Nikon D2X und einem 24mm Objektiv. Das Datenbündel umfasst 90 Bilder, die an verschiedenen Standpunkten, in unterschiedlichen Aufnahmehöhen und mit variierender Kamerawälzung erzeugt wurden. Dem Datensatz liegen reale Parameter für die innere Orientierung zu Grunde; er umfasst 164 dreidimensionale Objektpunkte. Hieraus wurde ein fehlerfreier Datensatz erzeugt.

Abb. 2 zeigt den 3D-Datensatz in verschiedenen Ansichten. Die obere Abbildung zeigt eine Seitenansicht, in der die gewählten Aufnahmehöhen deutlich werden. Die linke der unteren Abbildungen zeigt eine Draufsicht zur Veranschaulichung der Aufnahmestandpunkte im Verhältnis zu den Objektpunkten. Die roten Elemente stellen in beiden Darstellungen die Aufnahmepositionen, die gelben die vorhandenen Bildstrahlen sowie die blauen Elemente die Objektpunkte dar. Die rechte untere Abbildung zeigt nochmals die relative Lage der Aufnahmepositionen zum Objektraum.



Abb. 2: 3D-Datensatz als Rundum-Verband in verschiedenen Ansichten

Der simulierte fehlerfreie Datensatz wurde mit einem kommerziellen Bündelausgleichungsprogramm getestet. Die Ergebnisse zeigten keine Änderungen gegenüber den Ausgangsdaten. Das Simulationsprogramm wie auch die Bündelausgleichung arbeiten also korrekt und können als überprüft angesehen werden.

### 2.2 2D-Datensatz

Auch für diesen Datensatz dienten Kalibrierungsmessungen an einem 2D-Prüfkörper mit einer Nikon D2X und einem 24mm Objektiv als Berechnungsgrundlage. 22 Aufnahmen wurden hergestellt, in verschiedenen Standpunkten und mit variierender Kamerawälzung. Der Prüfkörper enthält 72 Objektpunkte. Wiederum wurde ein fehlerfreier Datensatz erzeugt.

Abb. 3 zeigt den 2D-Datensatz in verschiedenen Ansichten. Die roten Elemente stellen die Aufnahmepositionen, die gelben die vorhandenen Bildstrahlen und die blauen die Objektpunkte dar. Die obere Abbildung zeigt eine Seitenansicht inklusive der Bildstrahlen. Die unteren Abbildungen veranschaulichen die relative Lage der Aufnahmepositionen zum Objektpunktfeld.



Abb. 3: 2D-Datensatz als Rundum-Verband in verschiedenen Ansichten

Auch der 2D-Datensatz wurde durch Bündelausgleichung überprüft. Ergebnisse und Ausgangsdaten stimmten überein.

### 3 Fragebogen und Diskussionen

Grundsätzlich sollten mit dem Fragebogen Bedarf und Interesse für eine Bereitstellung von Daten zur Zertifizierung ermittelt werden. Als Ergebnis der Fragebogenaktion und einer Reihe von Gesprächen mit Software-Herstellern und -Nutzern ergaben sich folgende Diskussionspunkte:

- 1. Sollen überhaupt 2D und 3D Datensätze für eine Überprüfung der Software zur Verfügung gestellt werden? Diese Frage wurde zumeist bejaht.
- 2. Aufnahmekonfigurationen entstehen je nach Anwendung in unterschiedlicher Form. Eine Reduzierung des Datenmaterials kann zu großen Abweichungen und Ungenauigkeiten führen. Grobe Fehler sowie minimale Schnittbedingungen werden unterschiedlich in der Ausgleichungssoftware behandelt und können ein Gesamtergebnis signifikant verändern. Welche Szenarien sind signifikant und bedürfen einer Überprüfung? Die Rückmeldungen aus dem Fragebogen ergeben diesbezüglich keine einheitliche Aussage. Verschiedene Konfigurationen und Berücksichtigungen grober Fehler werden jedoch mehrheitlich als notwendig angesehen.
- 3. Die Parametersätze der Bündelausgleichung erfordern ein wissentliches Handeln. Passinformationen wie Passpunkte und Maßstäbe müssen berücksichtigt werden. Auch hierbei ist alles stark abhängig vom Anwendungsfall. Viele Bündelausgleichungsprogramme verfügen über Routinen zur Fehlerelimination, die automatisch oder manuell und sowohl mit als auch ohne Reaktivierung vermeintlicher Fehler arbeiten. Aus all diesen Eingriffsmöglichkeiten für den Nutzer können sich große Unterschiede in den Resultaten ergeben. Können und müssen all diese Möglichkeiten geprüft werden? Die Diskussion in ergab, dass vor allem ein Augenmerk auf Systemmaßstäbe und Algorithmen zur Fehlerbehandlung geworfen werden soll.
- 4. Der funktionale Ansatz der inneren Orientierung kann unterschiedlich sein. Je nach Form der verwendeten Kamera und Optiken wirken sich die Parameter unterschiedlich stark auf die Auswertung und die Genauigkeit des Ergebnisses aus. Für die Bereitstellung von Datensätzen zur Überprüfung von Software müssen daher die Ansätze definiert werden, um eine passende Datengenerierung zu gewährleisten. Entgegen den momentanen Überlegungen soll laut Fragebogenteilnehmer die Berücksichtigung von Affinität und Scherung zur Datensatzbereitstellung erfolgen. Diesbezüglich besteht weiterer Diskussionsbedarf. Gegebenenfalls müssen mehrere fehlerfreie Datensätze jeweils unter Berücksichtigung verschiedener funktionaler Ansätze bereitgestellt werden.
- 5. Die Diskussion, welche Daten zuerst für die Verifizierung zur Verfügung gestellt werden sollten, führte zum Ergebnis, dass zunächst einmal fehlerfreie Datensätze, basierend auf einem vorgegebenen funktionalen Modell zur Verfügung gestellt werden sollten, um das grundsätzliche Funktionieren der Software prüfen zu können.
- 6. Weiterhin ist es denkbar, für eine Verifizierung "fehlerbehaftete" Datensätze zu entwerfen und über den Rückfluss ausgeglichener Objektpunkte Längenmessabweichungen zu bestimmen. Für dieses Verfahren muss berücksichtigt werden, ob alle Näherungswerte für die Ausgleichung oder lediglich Beobachtungen und Passinformationen bereitgestellt

werden. Bereits die Näherungswertberechnung kann eine fehlerhafte Ausgleichung verursachen und den Objektraum deformieren. Aus der Diskussion zu diesem Punkt kann derzeit keine einheitliche Aussage formuliert werden.

### 4 Literaturverzeichnis

- EL-HAKIM, S.F., BERALDIN, J.-A. & F. BLAIS, 2003: Critical Factors and Configurations for Practical Image-Based 3D Modeling. Proceedings Optical 3-D Measurement Techniques VI (Hrsg. A. Grün & H. Kahmen), Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, S. 159-167
- HASTEDT, H., LUHMANN, T. & TECKLENBURG, W., 2004: Bestimmung von Einflussgrößen in der Nahbereichsphotogrammetrie mittels Monte-Carlo-Simulation, Publikationen der DGPF, Band 13, S. 359-366
- HASTEDT, H., LUHMANN, T. & W. TECKLENBURG, 2005: Simulationsbasiertes Systemdesign für die optische Messtechnik nach VDI/VDE 2634. Publ. DGPF, Bd. 14 (Hrsg.: E. Seyfert), Potsdam, S. 319-326
- HASTEDT, H., PEIPE, J., & TECKLENBURG, W., 2007; Entwurf von Datensätzen zur Softwarezertifizierung in der Nahbereichsphotogrammetrie. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Oldenburger 3D-Tage 2006 (Hrsg.: T. Luhmann & Ch. Müller), Wichmann, Heidelberg
- LUHMANN, T. (2003): Nahbereichsphotogrammetrie. Wichmann, Heidelberg, 586 S.
- LUHMANN, T., PEIPE, J. & W. TECKLENBURG, 2006: Zertifizierung von Software zur Bündelausgleichung in der Nahbereichsphotogrammetrie. Publ. DGPF, Bd. 15 (Hrsg.: E. Seyfert), Potsdam, S. 141-145
- PEIPE, J. & W. TECKLENBURG, 2006: Vergleich von Softwaretools zur Kamerakalibrierung. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Oldenburger 3D-Tage 2006 (Hrsg.: T. Luhmann & Ch. Müller), Wichmann, Heidelberg, S. 106-111
- REMONDINO, F. & C. FRASER, 2006: Digital Camera Calibration Methods: Considerations and Comparisons. Proceedings ISPRS Com. V Symposium, Dresden, S. 266 - 272

# Qualitätsmanagement Laser Scanning – Struktur, Erfassung und Umsetzung

### HEINZ STANEK<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Airborne Laser-Scanning (ALS) und terrestrisches Laser-Scanning (TLS) sind heute als bewährtes Verfahren im Vermessungswesen charakterisierbar. Aktuelle Sensortypen und deren optimierte Kombination eröffnen jedoch nun neue Anwendungen und Qualitätsniveaus. Dieser Beitrag hat die Vorstellung einzelner Aspekte auf das entsprechende Qualitätsmanagement, sowie dessen Handhabung mit Auswirkungen auf einzelne Anwendungsbereiche zum Inhalt.

## 1 Einleitung

Die Verarbeitung der, durch Laserscanning e rfassten Oberflächeninformation, erfordert die Einbeziehung von Zusatzinformation für die Georef ernzierung und eventuell auch Daten von Zusatzsensoren – etwa Farbinformation mittel s digitaler Kameras. Auch die Verknüpfung von TLS Daten mit separat erfassten, oder bereits vorhandenen Oberflächen ist häufig erforderlich.

Die bei der Akquisition und den nachfolge nden Bearbeitungsschritten durchgeführten Operationen stellen, sowohl einzeln, als au ch in deren Kombination, komplexe Berechnungen und Verarbeitungen dar. Geeignete Qualitätspara meter, wie etwa Genauigkeiten, Auflösungen und andere müssen bestimmt und deren Ausw irkungen auf das Endprodukt beschrieben und analysiert werden.

Für die Planung eines projektspezifischen workflow's sind die Auswahl und Parametrisierung des Laserscanners, die erforderliche Zusatz information, sowie die Verarbeitungsschritte individuell abzustimmen. Speziell die Umsetzung in der praktischen Bearbeitung erfordert dabei eine häufige Konvertierung von Oberflächen und Zu satzinformationen zwischen den einzelnen Bearbeitungsschritten. Die Konvertierung über vorde finierte Schnittstellen gibt dabei häufig inhaltliche Schranken vor, und bedeutet oft we sentlichen Zusatzaufwand mit entsprechenden wirtschaftlichen Mehrkosten.

Neben technischen und wirtschaftlichen Aspekten stellt sich beim Einsatz von ALS bzw. TLS natürlich die Frage nach der erzielbaren und der tatsächlich erzielten Qualität. Zur vollständigen Beschreibung muss das Gesamtsystem - besteh end aus Sensoren, Zusatzinformationen, Bearbeitungseinflüssen und Produktaufbereitung - mit Hilfe von geeigneten Qualitätsparametern definiert und wertemäßig beschrieben werd en. Aus der Planung von workflow's unter Einbeziehung des Qualitätsmodells können schri ttweise die geplanten Qualitätsinformationen abgeglichen werden.

Die Planung und laufende Analyse von Qualitätsman agementsystemen soll für einzelne Projekte exemplarisch dargestellt werden. Schwer punktmäßig sollen dabei Anwendungen von TLS, teilweise in Kombination mit s ynchron erfasster Farbinformation, angesprochen werden. Dargestellt werden auch Beispiele in Kombination von TLS und ALS für periodisch wiederholte Erfassungsarbeiten.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Dr. Heinz Stanek: Vermessungsbüro Dipl.Ing. Peter Schmid, Inkustrasse 1-7, 3400 Klosterneuburg

Gezeigt werden exemplarisch die Entwicklung und Differenzierung von workflow' Qualitätsaspekte und deren Abbildung im Qualitätsmanagementsystem.

s.

In seiner, sehr grundsätzlichen Darstellung, spricht Prof. Kraus vom IPF der TU Wien von einem Paradigmenwechsel in der Photogrammetrie, der durch Einsatz von Airborne Laser-Scanning (ALS) voll im Gange ist (KRAUS 2002). Dabei wird der Beitrag der Photogrammetrie als Grundlage der Auswertemethodik von Laser-Scanner Daten analysiert. Speziell die hybride Charakteristik des Sensors fordert eine Modifikation der Missionsplanung, Erfassung und Auswertung. Der Übergang vom passiven Sensor zum aktiven Sensor, die zeitliche Analyse des empfangenen Signals, aber auch die Integration von Laserscanner, GPS und INS bilden hier die neuen technologischen Herausforderungen. Techniken aus dem digitalen photogrammetrischen Auswerteprozess, wie etwa Techniken zur Georeferenzierung, können adaptiert und übernommen werden. Die hybride Erfassung von 3D Geländepunkten mit Farb- bzw. CIR-Informationen zeigen den Weg dieses Paradigmenwechsels bis in den Bereich der Fernerkundungsanwendungen.

Gleichzeitig setzte auch die verbreitete Anwendung des Terrestrischen Laserscannings (TLS) in der geodätischen Messpraxis ein. Das geodätische Standardgerät – der selbstregistrierende Tachymeter – erfährt Konkurrenz bzw. Ergänzung durch TLS. Auch diese Geräte verfügen teilweise über zusätzliche Sensoren für die RGB Erfassung,

## 2 Laserscanning - Position in der geodätischen Messtechnik

Laserscanner zeigen als effiziente Oberflächen messsysteme seit nunmehr mindestens 10 Jahren eine deutliche Innovationsrichtung auf. Neben ALS werden terrestrische Anwendungen TLS zur Erfassung von Oberflächen und Objektstrukturen herangezogen.

Dabei können Ergebnisse aus ALS und TLS durchaus direkt kombiniert werden. Als Beispiele solcher Kombinationen können die Erfassung von Gebäuden und Straßenräumen in umfassenden 3D Stadtmodellen dienen. Dabei werden die Dach strukturen mit ALS und die Fassadenbereiche durch TLS erfasst und in einem gemeinsamen Koordinatensystem kombiniert.

Aus einem anderen Blickpunkt können TLS Erfass ungen für die kleinräumige Aktualisierung von ALS Projekten effizient eingesetzt werden. Di ese Kombination wird etwa zur periodischen Aktualisierung von Abbaubereichen (Schottergrube n etc.) oder Rohstofflagern zur laufenden Aktualisierung der Volumenbestände eingesetzt.

Grundlegend für diese flexiblen Vorgehensweisen sind natürlich entsprechend Datenmodelle und ein transparentes Qualitätsmanagement (QM).

### 2.1 Airborne Laserscanning

Für den ALS Bereich sind bereits relativ weit entwickelte Datenmodelle und Fileformate definiert. Neben der, trotz enormen Speich erbedarf immer noch häufig verwendeten ASCII Formate, wird hier etwa das binäre LAS Format - <u>www.lasformat.org</u> – zunehmend verwendet. Dieses Format geht auf die heutige Sensortechnologie, etwa, Mehrfachechos, Intensitäten etc. ein und ist in den gängigen Softwareprodukten he rstellerunabhängig implementiert. Einzig die Pulsbreite, die etwa für die Anwendung in der fu II waveform Analyse benötigt wird, kann nicht in diesem Format allgemeingültig abgelegt werden.

Die Verknüpfung mit anderen Informationsquelle n, etwa IMU Daten, oder auch digitale Kamerabilder erfolgt über eine Zeitmarke.

Die Angaben zur Raumpositionierung und Orientierung des ALS Sensors aus IMU Daten stehen ebenfalls mit Zeitmarken zur Verfügung, sodass eine Kombin ation zur Georeferenzierung erfolgen kann. Diese Information wird auch für synchron erfasste Zusatzdaten, wie etwa RGB Bilder verwendet.

Zur Auswertungen sind weiters Information zur Ka librierung des Gesamtsystems erforderlich. Die Kalibrierparameter können auch aus den Kampagnendaten berechnet bzw. laufend überprüft werden.

### 2.2 Terrestrisches Laserscanning

Diese Entwicklungen sind im TLS Bereich le ider noch nicht geben. Hier werden herstellerspezifische Fileformate jeweils nur innerhalb einer Produktpalette unterstützt. Der Austausch zwischen Programmsystemen verschiede ner Hersteller erfordert im Regelfall zeitund speicherintensive Konvertierungsarbeiten und is t meist mit Informationsverlust verbunden. Eine direkte Zeitkorrelation ist im TLS Bereic h kaum vorgesehen, sodass die Verknüpfung mit anderen Datenquellen und Sensoren aufwendig ist.

Die Positionierung der einzelnen Scanneraufna hmen in einem homogenen Koordinatensystem erfolgt über Passpunkte. Teilweise werden di orientiert. Die Berechnungen erfolgen in geräte spezifischen Programmsystemen. Die Ausgabe von Qualitätsinformationen erfordert dabei stets die genaue Analyse der Spezifikationen des Herstellers zur korrekten Interpretation dieser Angaben.

Häufig sind die Sensoren mit digitalen Kameras zur Bilderfassung kombinierbar. Konstruktionsbedingt sind dabei entsprechende Kalibrierungen zu berücksichtigen und durch Testmessungen laufend zu überprüfen.

Als Austauschformat werden häufig ASCII Files mit Koordinaten, ergänzt um Intensität und Rot, Grün, und Blauwerten verwendet. Dabei fallen durchwegs große Datenmengen an und essentielle Information werden nicht erfasst.

So werden etwa Angaben wie:

- Aus welcher Aufstellung stammt der einzelne Punkt?
- Wie ist das Ziel zum Aufnahmestandort orientiert?
- Wie stimmen räumlich benachbarte Punkte, erfasst aus verschiedenen Aufstellungen überein?

nicht dokumentiert.

Oftmals müssen dann genau diese Aussagen mühsam für die weitere Verarbeitung und Analyse aus der 3D Punktwolke rekonstruiert werden.

## 3 Qualitätsmanagement - Struktur und Gliederung

Als Datenmanagement soll hier die Gesamtheit aller technischen und organisatorischen Maßnahmen und Methoden verstanden werden, die die Erfassung, Verarbeitung und Archivierung von Daten von Laserscannern und Zusatzquellen umfassen. Das Qualitätsmanagement umfasst dabei im speziellen alle, zur Beschreibung und Analyse von

Qualitätseigenschaften geeigneten Daten. Diese Qualitätseigenschaften werden durch geeignete definierte Qualitätsparameter beschrieben. Der genauen Spezifikation und Bestimmung kommt entsprechend große Bedeutung zu. Die hier angesprochenen Aspekte lassen sich mit dem Begriff Metainformation zusammenfassen. Der Stellenwert von Metainformation ist wohl durch die laufenden Bestrebungen zur einheitlichen Beschreibung und Verwendung im nationalen und internationalen Normierungswesen hinreichend belegt.

### 3.1 Qualitätsmanagement - unterschiedliche Sichten

Die in diesem Abschnitt dargestellte QM Strukt ur zeigt die verschieden Sichten auf das QM-Modell und belegt dessen zentrale Bedeutung für die Kommunikation zu einem Datensatz.

Der direkte Nutzen der transparenten und n achvollziehbaren Spezifikation des Datenmodells, sowie des Qualitätsmanagements (QM) liegt in der effizienten Unterstützung der Kommunikation zwischen Produzent und Kunde. Be ide Seiten entwickeln unterschiedliche, aus den eigenen Aufgaben abgeleitete Sichten, auf diese Inhalte. Oftmals sind beide Seiten weiter unterteilte Einheiten, deren Kommunikation sich ebenfalls sehr deutlich auf dem QM abstützt.

Im Idealfall deckt das QM System alle qualitäts relevanten Rückfragen zwischen Produzent und Konsumenten ab.

### 3.1.1 QM Produzentensicht

Auf der Produzentenseite werden Daten von verschiednen Herstellern, aus verschiednen Kampagnen oder unterschiedlichen Erfassungs- und Verarbeitungsmethoden kombiniert.

Im Vordergrund stehen hier die Genauigkeiten der einzelnen Sensoren in zahlreichen Einzelaspekten. Dabei ist die korrekte Inte rpretation der von den Herstellern angegeben Kennzahlen und deren Gültigkeitsbereiche genauesten s zu analysieren. Speziell zu beachten und zu unterscheiden sind dabei Angaben zur Gena uigkeit, Auflösung, Messunsicherheit, sowie Angaben zu statistischen Sicherheiten.

Auch die Verknüpfung von verschiedenen Sensorda ten sowie deren Korrektionen wirkt sich auf die ermittelten Qualitätsangaben aus. Von Intere sse sind daher neben den Zahlenwerten selbst, auch die angewandten Methoden zu deren Ermittlung.

#### 3.1.2 QM Konsumentensicht

Aus dem Blickwinkel des Konsumenten, bzw. de s Anwenders interessiert in erster Linie di e Verwendbarkeit des Datensatzes für seinen Anwendungsbereich. Dieser im Marketing als "fitness for use" eingeführte Qualitätsbegriff entzieht sich meist einer einfache n Beschreibungsform in einem einzelnen Qualitätspa rameter. Vielmehr erfordert die Bewertung des Datensatzes aufgrund der im QM System bereitgestellten Parameter detaillierte Fachkenntnis zur korrekten Interpretation dieser Parameter.

Auf der Kundenseite werden Daten oftmals für mehrere Anwendungsbereiche gemeinsam genutzt. Dabei müssen alle Anwendungsbereiche berücksichtigt werden.

#### 3.1.3 QM Providersicht

Häufig werden Datenbestände zur allgemeinen weiteren Nutzung von definierten Institutionen vorgehalten. Entscheidend ist dabei die Über nahme der QM Information vom Produzenten, eventuell durchgeführten Überprüfungen, sowie die Bereitstellung der QM Information für den

späteren Anwender. Die Herausforderung für den Provider besteht hier in der vollständigen Beschreibung von QM Aspekten, in einer für den Anwender direkt verwertbaren Form. Erschwerend wirkt sich dabei die Tatsache aus, dass häufig Anwendungen und Projekte erst nach Vorhandensein von Datenbeständen in Angriff genommen werden.

Die Möglichkeit zur Optimierung der Datenerfassu ng ist dann naturgemäß nicht mehr gegeben, wenngleich natürlich wirtschaftliche Gründe zu r Mehrfachnutzung der Daten naturgemäß sehr hoch bewertet werden.

## 4 Qualitätsmanagement - Laserscanning

In diesem Abschnitt sollen einige Aspekte de r des Qualtätsmanagement für Laserscanning herausgegriffen werden. Dabei sollen weder volls tändige QM Modelle dargestellt, noch ein Universalrezept angegeben werden. Vielmehr we rden einige, aus der Praxis zahlreicher LS Projekte bewährte Methoden, vorgestellt.

### 4.1 Kalibriermessungen

Der Begriff Laserscanning steht stets für verschiedener Komponenten und Sensoren in einem Gesamtsystem. Die Qualitätskennzahlen der einzelnen Komponenten üben dabei mehr Gesamtergebnis aus. So spielen etwa die Genauigkeit der Entfernungsmessung, die Oberflächenqualität und Stellgenauigkeit der Ablenkungseinrichtung und im Falle von ALS auch die Zeitsynchronisation eine zentrale Rolle . Diese Auswirkungen werden von den Anbietern analysiert, optimiert und in Ihrer Auswirkung Anwender mitgeteilt bzw. in die Auswertung als vorgegeben Kenngrößen eingebunden.

Die Notwendigkeit der Verwendung korrekter und aktueller Kalibrierparameter ist damit deutlich belegt.

Wird eine Kombination von Sensoren einge berücksichtigen. So wird etwa im TLS Be Bildinformation, mittels speziell adaptierter Ausrichtung der beiden Sensoren wir meist mit sp eziellen Kalibrierroutinen ermittelt. Vereinzelt werden auch Verfahren zur Selbstkalibrierung im Zuge der Projektbearbeitung angewandt.

In jedem Fall ist die Dokumentation de r jeweils verwendeten und in der Auswertung berücksichtigten Kalibrier- und Korrekturwerte essentiell.

### 4.2 Parameterauswahl

Die projektspezifische Auswahl von Parametern zur Steuerung der Sensoren, der Datenakquisition und der Verarbeitung ist ei ne Kernkompetenz im LS Einsatz. Die Projekterfordernisse sind dabei unter Wahrung von limitierenden Größen wie etwa, Sensorcharakteristik, Datenvolumen und Beobacht ungszeit etc. zu optimieren. Eigentlich sollte auch die Auswahl des, bzw. der Sensoren am Anfang dieser Optimierung genannt werden. Dabei zeigt häufig eine Kombination verschiedener Sensoren das beste Ergebnis auf.

So zeigt etwa für 3D Stadtmodelle eine Ko mbination von ALS mit TLS hohe Effizienz. Im Straßenraum können hohe Auflösung sowie Detaillie rung und geometrische Genauigkeit durch TLS erfasst werden und mit der hohen Flächenleistung von ALS im Dachflächenbereich und zur Erfassung der Bodenbedeckung kombiniert werden.

Der unabhängigen Überprüfung der durch die Parameterauswahl festgelegten Gesamtcharakteristik kommt naturgemäß ein hoher Stellenwert zu. Typischerweise werden etwa die tatsächlich erreichte Auflösung am Boden, die erzielte Überlappung von Flugstreifen, die Anzahl der erfassten Punkte über das Gesamtpr ojekt, etc., als Grundlage für die Evaluierung herangezogen.

### 4.3 Georefernzierung

Alle erfassten Messwerte und Sensordaten sollen sich auf ein definiertes Koordinatensystem beziehen. Dies ermöglicht die beliebige Kombination aller erfasster Daten und die Integration zu, ebenfalls in diesem Koordinatensystem vorliegenden Datenbeständen.

Für die Festlegung werden einerseits Positio nsangeben und Ausrichtungen laufend mit erfasst und andererseits Bezugsbereiche mit bekannten Koordinaten festgeschrieben.

Die Festlegung der Bezugsbereiche mit Bezug auf definierte Koordinatensysteme ist jeweils zu hinterfragen. Ein spannungsbehaftetes Grundlagennetz wird sein einnere Spannungstruktur über die Bezugsbereich auf das LS Operat übertragen. Als Beispiel kann ein großräumiges ALS Operat mit dienen. Dabei kann eine lokal mo dellierte Geoidform, ohne Berücksichtigung in der ALS Auswertung zu einer verzerrten Genauigkeitsdarstellung führen.

### 4.4 Differenzierung und Klassifizierung

Das Grundlegende Ergebnis einer LS Kampa gne wird häufig als 3D Punktwolke und Zusatzinformation gesehen. Tatsächlich ist natürlich die in den Punkten enthaltene Struktur von größtem Interesse. Die Klassifizierung der Punkte, etwa in Boden-, Vegetations-, Dachflächenpunkte, etc. eröffnet weite Anwendungsbereiche.

Die Grundlage dieser Klassifizierung bilden ge ometrische Algorithmen, die die gegenseitige Lage der Einzelpunkte zueinander berücksichtigen, oder die vertiefte Analyse des Einzelsignals selbst. Im einfachern Fall wird dabei die In Erfassung und Analyse der empfangenen Systemparametern wie etwa der Flughöhe, de Zuordnung der Reflektivität des abgetasteten Iokaler Nachbarschaft analysiert werden.

Die Analyse der Signalstruktur wird derzeit se ermögliche die Erfassung von mehreren Signa Waldflächen auftreten. Ein erstes Signal wird dann von der Baumkrone und ein letztes vom Boden reflektiert. Die aktuellste Entwicklung zeigt hier die full waveform Analyse auf. Dabei wir der gesamte empfangene Signalverlauf erfa sst. Aus diesem werden dann Einzelimpulse aus Laufzeit, Pulsform, Amplitude und Abfolge analysiert (WAGNER et. al 2006).

Die hier nur grob skizzierten Möglichkeiten sind enorm, erfordern jedoch aus dem Blickpunkt Qualitätsmanagement besonderes Augenmerk hinsichtlich Transparenz, Nachvollziehbarkeit und erzielter Qualität.

### 4.5 Produktkonformität

Die vorangegangen Punkte haben die Erstell ung und Verarbeitung der akquirierten Daten zum Inhalt. Der Fokus hier nun die Überprüfung, ob die Ergebnisse die geforderten Ziele und Bedürfnisse auch tatsächlich, in welchem Ausmaß erfüllen.

Gerade Datensätze, die dem wirtschaftliche Grundsatz einer Mehrfachverwendung, zugeführt werden sollen müssen entsprechend dokumentiert werden. Neben der Erfassung, ist dabei die Verarbeitung, und die bereits durchgeführte Anwendung für eine spätere Nachnutzung essentiell.

Die Darstellung und Aufbereitung dieser Anga ben in möglichst allgemein verwendbarer und normierter Präsentationsform soll an akti ve Normierungsbestrebungen geknüpft werden. Normen zu Metadaten bzw. Metainformation bietet hier die ge eignete Grundlage und Begriffsumgebung für diese Dokumentation.

Die transparente Ermittlung und Dokumentation so lcher Überprüfungen ist wesentlich, um die Produktkonformität belegen zu können. Diese Be lege definieren den Wert des gelieferten Datensatzes und die damit möglichen Anwendunge n. Letztlich sind dabei auch Haftungsaspekte definiert und abgegrenzt.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Begriff und die Handhabung von Qualitätsinformation im Bereich ALS und TLS ist geprägt durch Kombination verschiedener Technologien, unterschiedlichen Bearbeitungsformen und zumindest drei unterscheidbaren Benutzersichten. Ziel eines Qualitätsmanagements ist es nun die Interaktion zwischen all diesen Aspekten umfassend und transparent zu unterstützen. Aufgrund dieser Vielschichtigkeit, aber auch bedingt durch laufende Weiterentwicklung von Technologien und Anwendungsbereichen ist ein entsprechend flexibler Zugang für die Beschreibung eines QM Systems angezeigt. Andererseits ist damit auch die entsprechende Fachkompetenz aller Beteiligten gefordert, um Fehlverwendungen zu vermeiden.

Die forcierte Entwicklung von Services basierend auf verfügbarer Metainformation wird auch in diesem Bereich eine weitere und effiziente Handhabung unterstützen. Dies wird wohl auch zur intensiveren und damit wirtschaftlicheren Verwendung von Datenbeständen beitragen.

## 6 Quellen- und Literaturverzeichnis

KRAUS K. (2002): Laser-Scanning – ein Paradigma-Wechsel in der Photogrammetrie Vortrag im Rahmen der Dreiländertagung der DGPF, SGPBV und ÖVG, 4.09.2000
WAGNER W., ULLRICH A., DUCIC V., MELZER TH. & STUDNICKA N., (2006): Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. ISPRS Journal of Photogrammatry & Remote sensing (60) 2006, 100 - 112
www.lasformat.org: ASPRS LIDAR Data Exchange Format Standard Version 1.1 March 7, 2005. last visit 2007.05.01

# Praktische Methoden zur Verifikation von hochgenauen landesweiten Laser Höhenmodellen

### ROBERTO ARTUSO, 1

Zusammenfassung: Als Teil eines Projekts zur Aktualisierung von landwirtschaftlichen Nutzflächen auf der Basis der Amtlichen Vermessung, leitet das Bundesamt für Landestopografie (swisstopo) seit sechs Jahren landesweit die Erfassung von präzisen digitalen Lasermodellen (Boden- und Oberflächenmodelle). Eine der Hauptaufgaben von swisstopo liegt darin, diese Laser Höhenmodelle unterschiedlicher Herkunft zu verifizieren, zu anerkennen und deren Endqualität zu garantieren. Um dieses Ziel zu erreichen, musste das Bundesamt für Landestopografie ein neuartiges Verifikations-Verfahren entwickeln, das während den letzen sechs Jahren intensiv getestet wurde. Diese Methodik wird im folgenden Artikel näher beschrieben.

## 1 Einleitung

Unter der Bezeichnung 'Projekt LWN' leitet das Schweizer Bundesamt für Landestopografie (swisstopo) seit dem Jahr 2000 ein Projekt zur Aktualisierung von landwirtschaftlichen Nutzflächen auf der Basis der Amtlichen Vermessung. Davon betroffen sind primär Hügel- und Bergzonen (gemäss landwirtschaftlichem Produktionskataster der Schweiz) bzw. alle Gebiete unter 2000 m ü. M. Als wichtige Teilaufgabe dieses Projektes ist die landesweite Erfassung von präzisen digitalen Boden- und Oberflächenmodellen, welche zur Herstellung eines exakten schweizweiten Orthophotos vorgesehen sind. Das Laserscanning ist die dazu gewählte Erfassungsmethode.

Die Arbeiten wurden im Rahmen von mehreren WTO-Verfahren verschiedenen privaten Unternehmern in Auftrag gegeben. Die Hauptaufgabe vom Bundesamt für Landestopografie bestand dabei diese Laserhöhenmodelle unterschiedlicher Herkunft zu verifizieren, zu anerkennen und schlussendlich deren Endqualität zu garantieren. Um dieses Ziel zu erreichen, musste das Bundesamt für Landestopografie ein neuartiges Verifikationsverfahren entwickeln, das während den letzen sechs Jahren intensiv getestet worden ist. Diese Verifikationsmethode für Laserhöhenmodelle besteht aus einer Kombination von lokalen und globalen Kontrollverfahren, die auf verschiedenen Geodatensätzen (Orthophotos, Gradientenbilder, Punktdichtekarten, Differenzrechnungen, GPS-Messungen, usw.) basieren und in einer modernen GIS-Umgebung eingebettet sind.

Die Verifikationsphilosophie von swisstopo und die eingeführten Instrumente zur Überprüfung dieser Höhendaten werden im folgenden Kapitel näher beschrieben.

### 1.1 Die neuen Höhenmodelle: DTM-AV und DOM

Zur Herstellung des neuen digitalen Bodenmodells (DTM-AV) und des Oberflächenmodells (DOM) wurde die Airborne Lasertechnik gewählt. Die Erfassung der Höhenmodelle ist in sechs

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Roberto Artuso: Bundesamt für Landestopografie, Seftigenstrasse 264, CH-3084 Wabern, roberto.artuso@swisstopo.ch

Etappen gegliedert, dabei wurden die Arbeiten im Rahmen von sechs WTO-Verfahren verschiedenen privaten Firmen zugeteilt. Im Jahre 2000 ist die erste Etappe lanciert worden und das Projekt wird Ende 2007 abgeschlossen sein (siehe Abbildung 1). Das Bundesamt für



Landestopografie hat dabei die Aufgabe das Projekt zu leiten und die Daten zu überprüfen.

Abb.1: Räumliche Aufteilung der Erfassungsgebiete: Grün: abgeschossene Etappen; Rosa: Gebiete in Bearbeitung; Blau: Regionen über 2'000 m ü. M.

Technische Charakteristiken der Höhendaten:

- Höhengenauigkeit:  $\pm 0.50 \text{ cm} (1\sigma) \text{ im offenen Gebiet}, \pm 1.50 \text{ cm} (1\sigma) \text{ im Wald}$
- Punktdichte: besser als 1 Punkt / 2 m<sup>2</sup>
- Gelieferte Datensätze: DTM-AV als Punktwolke und 2 m Gitterdatensatz
- Flugperiode

DOM als Punktwolke und 2 m Gitterdatensatz Die erlaubte Flugperiode erstreckt sich von November bis März. Der Waldboden muss dabei erfasst werden.

## 2 Gründe und Aufgaben für die Datenverifikation

Im Jahr 2000 wurde das Projekt gestartet und der erste Unternehmer wurde mit der Erfassung der Laserhöhenmodelle beauftragt. Bis zu diesem Zeitpunkt war die Airborne Laserscanning-Methode in der Schweiz nur vereinzelt und lokal angewendet sowie getestet worden. Nur einzelne Organisationen und Länder hatten die Lasermethode zur Erfassung ihrer Höhendaten schon erfolgreich angewendet (siehe [SCHERER-HERTZ, 2002], [SCHLEYER, 2002], [WOUTERS & BOLLWEG, 1998]). Es bestand auf Seiten der Laserscanning-Anbieter und der -Auftraggeber kaum Erfahrung in der Erfassung von Geländeeigenschaften wie sie in der Schweiz vorkommen, d.h. eine Mischung von Hochgebirge, hügeligen Regionen und dichten Wäldern.

Allgemein war zu dieser Zeit bekannt, dass die Lasertechnik und die Klassifizierung der Laserrohdaten (DTM-AV und DOM) auf Fehler sehr anfällig war (siehe [SCHENK, 2001], [VOSSELMAN & MAAS, 2001]).

Sich dessen bewusst

- dass die Endqualität der hergestellten Höhendaten ein wichtiger Faktor für die erfolgreiche Benutzung und Vermarktung ist.
- dass diese Daten f
  ür l
  ängere Zeit als Basis weitere Nachf
  ührungen dienen w
  ürden.
   f
  ür eine Vielfalt von Applikationen und f
  ür

entschloss sich die swisstopo Geld und Zeit in eine systematische und flächendeckende Überprüfung der Laserhöhenmodelle (DTM-AV und DOM) zu investieren.

## 3 Die Verifikationsmethode

### 3.1 Grundidee der Verifikation, eingesetzte Instrumente und Daten

Die ursprüngliche Fragestellung zur Überprüfung der neuen Laserhöhendaten war: "Wie verifiziert man das genauste flächendeckende Gelände- und Oberflächenmodell der Schweiz". Die Lösung für swisstopo lag darin, Prüfverfahren, die direkt auf den Daten laufen zu definieren. Anschliessend die Resultate der Prüfverfahren in verschiedenen Kombinationen mit bestehenden Geodaten zu vergleichen, zu interpretieren und zu analysieren.

Die benutzen Geodaten waren die folgenden:

- (a) genaue flächenhafte Daten wie: das DHM25, das auf Karten basierte Höhenmodell der Landestopografie / die 1:25'000 Pixelkarten der Landestopografie / das flächendeckende Orthophoto ,SWISSIMAGE' der Landestopografie / der Vektor 25, das auf der 1:25'000 Landeskarte basierende topographische Landschaftsmodell
- (b) präzise punktuelle Daten (Fixpunkte der Landesvermessung, Fixpunkte der Amtlichen Vermessung, lokale GPS Messungen) / die Bodenbedeckungsdaten der Amtlichen Vermessung

Da es damals keine kommerzielle Software gab, die eine Verifikation von Airborne Laserdaten ermöglichte, entwickelte swisstopo ein Programm, das ,LWN Check', welches diesen Test durchführt und die Resultate so herausschreibt, dass sie in einem GIS integriert werden können. Dort können die Daten im Anschluss mit den bestehenden Geodaten verglichen und interpretiert werden.

Durch die Charakteristiken der benutzten Vergleichsdaten teilen sich die Prüfverfahren in zwei Kategorien auf: die flächenhaften Prüfungen und die punktuellen Prüfungen.

### 3.2 Die Verifikation Prozedur

Die Qualitätskontrollen werden systematisch und flächendeckend über den gesamten Datensatz durchgeführt. Dabei werden die Rohdaten und die Gitterdaten der Produkte DOM und DTM-AV überprüft. Die Verifikation der Daten geschieht mehrheitlich im Büro, aus zeitlichen und finanziellen Gründen beschränken sich Feldbesuche und Feldmessungen auf ein Minimum. Die Prüfverfahren werden im Batch-Modus an einem Standard-PC durchgeführt. Die verschiedenen Resultate der Prüfverfahren werden anschliessend durch einen erfahrenen GIS-Operator in einem kommerziellen GIS-System (ArcGIS der Firma ESRI) und unter Beizug der oben erwähnten Geodatensätze kombiniert, angeschaut, verglichen, verifiziert und auf ihre Güte beurteilt. Die Resultate der Verifikation werden protokolliert und im Falle von ungenügenden Daten dem Unternehmer zur Stellungsnahme und zur Korrektur der Daten weitergeleitet.

## 4 Angewendete Prüfverfahren

### 4.1 Die flächenhaften Prüfverfahren

**4.1.1 Prüfung der formalen Aspekte:** Die erste Prüfung, die durchgeführt wird, ist die Kontrolle der gelieferten Höhendaten auf ihre Vollständigkeit, ihre Formate und ihre Liefereinheiten. Die Inhalte der Lieferungen und die Lesbarkeitsüberprüfung der Speichermedien werden manuell von einem Operator durchgeführt. Die Überprüfung der Formate und Lieferungseinheiten sowie die Plausibilität der gelieferten Höhendaten werden automatisch anhand der "LWN Check'-Software ausgeführt. Diese Prüfung erscheint trivial, ist aber bei der Erfassung von einem landesweiten flächendeckenden Höhenmodell, bei dem mehrere Akteure tätig sind, ein wichtiger Aspekt.

**4.1.2 Kontrolle der Punktdichte:** Die Endqualität der Höhenmodelle hängt einerseits sehr stark von der Güte der Einzelmessungen, anderseits von der räumlichen Aufteilung der Lasermessungen bzw. von der erreichten Punktdichte ab. Als zweite Prüfung werden anhand der klassifizierten Rohdaten georeferenzierte (\*tif, \*tfw) Punktdichtekarten berechnet. Die Punktdichte der klassifizierten Rohdaten wird anhand von zwei georeferenzierten Referenzgittern berechnet, die eine Maschenweite von 2 m bzw. 10 m aufweisen. Das Programm ,LWN-Check' zählt die Anzahl Laserpunkte, die pro Gittermasche vorhanden sind und generiert anschliessend die Punktdichtekarten. Auf der Basis eines definierten Wertebereichs und der Anzahl identifizierter Laserpunkte, bekommt jedes Pixel der Punktdichtekarte einen vordefinierten Farbwert.



Abb. 2: Links Ausschnitt Orthophoto, rechts Punkdichtekarte aus DTM-AV (Pixel = 2m x 2m)

Dieses Prüfverfahren erlaubt es unverzüglich zu erkennen, ob der Unternehmer, das zu verifizierende Gebiet sorgfältig erfasst und mit ausreichender Überlappung geflogen hat. Lücken

und ungenügende Punktdichten sind schnell identifizierbar. Durch die Hinterlegung eines Orthophotos kann sehr effizient die Plausibilität der erreichten Punktdichte im Waldgebiet überprüft werden.

**4.1.3** Visuelle Überprüfung der Plausibilität der Höhendaten: Um einen visuellen Eindruck der Höhendaten zu erhalten und nicht richtig klassierte Laserdaten zu identifizieren, wird anhand der Rohdaten ein Gradientenbild berechnet. Der Gradient ist der Ausdruck der berechneten Neigung zwischen den Einzelpunkten des Höhenmodells. Wie bei der Punktdichte werden die Resultate der Berechnung in Form von Pixeln in einer Gradientenkarte abgebildet. Jeder dieser Pixel ist 2 m x 2 m gross. Der Grauwert des Pixels bzw. die Farbe des Pixels wird von der grössten berechneten Neigung im ausgewählten Pixel, also in einer Fläche von 4 m<sup>2</sup>, bestimmt. Die Vergabe der Farbwerte erfolgt anhand einer vordefinierten Werteskala. Zum Beispiel werden in der Farbe Blau Neigungen grösser als 2.5 [m/m] markiert.



Abb. 3: Links Ausschnitt Orthophoto, rechts Gradientenbild aus DTM-AV (Pixel = 2m x 2m)

Das Gradientenbild ermöglicht eine erste visuelle Überprüfung der Höhendatenmorphologie. Ausreisser und nicht richtig klassifizierte Laserpunkte bewirken Artefakte im Gradientenbild und können damit problemlos identifiziert werden. In Kombination mit der Punktdichtekarte kann das Ausmass von Gebieten mit geringer Punktdichte auf Höhenmodellierung sehr schnell analysiert werden.

**4.1.4** Überprüfung der relativen Höhengenauigkeit des DTM-AV und DOM: Um eine globale Idee über die Korrektheit der Höhendaten zu bekommen, wird die Höhendifferenz zwischen dem DHM25 (CH Kartenbasiertes Höhenmodell) und den neuen Höhendaten DTM-AV und DOM berechnet (Delta Z = Neues Höhenmodell – DHM25). Die Unterschiede werden anhand einer georeferenzierten Differenzkarte abgebildet. Die Farben der Pixel stellen die verschiedenen Höhenuterschiede zwischen den Höhendaten dar. Abbildung 4 zeigt nach welchen Kriterien die Farben vergeben werden und ein Beispiel einer Höhendifferenzkarte.



Abb. 4: Links Prinzip der Farbvergebung, rechts Differenzkarte DTM-AV – DHM25 (Pixel = 2m x 2m)

Beide Höhenmodelle besitzen nicht die gleich können die Höhen nicht direkt verglichen werd erst Unterschiede grösser als 2 m als poten angeschaut. Differenzen kleiner als 2 m werden Genauigkeitsbereich des DHM25 liegen. Diese Di fferenzberechnungen machen es möglich, dass schlecht klassifizierte Punkte im DTM-AV Laserpunkte auf Bäumen oder Gebäuden sofort erkennbar.

**4.1.5 Identifizieren des Punktrauschens:** Um nicht richtige klassifizierte Punkte oder schlecht überlappende Streifen zu identifizieren, wird der Z-Wert aller Laserpunkte mit dem mittleren Z-Wert seiner Nachbarpunkte verglichen (5m Buffer). Ist dieser Wert grösser als 1.5 m wird dieser Punkt als gefärbtes Pixel (1 x 1 m) markiert und in einer Textdatei eingetragen. Mit Zuhilfenahme des Orthophotos sowie dem Gradientenbild können diese Daten anschliessend analysiert und als richtig oder falsch klassifiziert werden. Abbildung 5 zeigt schlecht gefälterte Punkte auf Bäumen im DTM-AV.



Abb. 5: Links Ausschnitt Orthophoto im Wald mit potentiellen falsch Klassifizierte Punkte im DTM-AV, rechts potentiellen falsch Klassifizierte Punkte im DTM-AV mit Gradientenbild hinterlegt.

### 4.2 Die punktuellen Prüfverfahren

**4.2.1 Lokale absolute Überprüfung der Höhengenauigkeit des DTM-AV und DOM:** Die absolute Höhengenauigkeit des DTM-AV und DOM wird anhand von präzisen Fixpunkten der Landesgeodäsie und der Amtlichen Vermessung überprüft. In Gebieten, wo nicht genügend bzw. keine Fixpunkte vorhanden sind und ein Problem in den Daten vermutet wird, werden neue Höhenreferenzdaten mittels GPS-Messungen ermittelt. Jeder Fixpunkt wird auf die interpolierte Oberfläche des DTM-AV bzw. des DOM projiziert, anschliessend wird die Höhendifferenz berechnet. Die Koordinaten der Fixpunkte und die berechneten Höhenunterschiede werden in einer Tabelle dargestellt, danach im GIS-System als Shapedatei importiert und interpretiert. Abbildung 6 zeigt eine Kombination aus Orthophoto und Höhendifferenzen. Jeder farbige Punkt beschreibt einen Höhenunterschied, dabei werden Höhenunterschiede grösser als 50 cm im Detail analysiert.



Abb. 6: Ausschnitt Orhophoto mit Punkdaten und Differenzwert (Fixpunkt – interpolierte Höhe auf DTM-AV)

**4.2.2** Lokale detaillierte Überprüfung der Plausibilität der Höhenmodelle: Um einzelne verdächtige Laserpunkte detailliert anschauen zu können und lokal die Morphologie der Höhenmodelle zu überprüfen, werden die Laserpunkte im Punkt-Editor "GVE" der Firma Inpho eingefügt. Diese Software ermöglicht es, die Punktwolken zu betrachten, sowie Höhenkurven und Höhenkartierung "on the fly" lokal zu generieren. "GVE" erlaubt es, dass jeder Laserpunkt mit seinem Z-Wert betrachtet und editiert werden kann. Abbildung 7 zeigt die Oberfläche von "Editor GVE" mit Einzelpunkten eines DOM und "on the fly" berechneten Höhenkurven.



Abb. 7: Ausschnitt aus dem GUI von "GVE": Punktwolke aus dem DOM, mit on "the fly" berechnete Höhekurven und Orthophoto

Durch die grosse Anzahl der Punkte und dem damit gekoppeltem Aufwand, wird diese Prozedur auf ein Minimum gehalten und nur dann angewendet, wenn die anderen Verifikationsverfahren keine Antwort geben.

**4.2.3 Feldkontrollen**: Eine andere angewendete Methode, um die Plausibilität der Höhenmodelle zu überprüfen, besteht in der Feldbegehung. Die Feldarbeit ist sehr zeitaufwändig und wird nur dann ausgeführt, wenn im Büro keine klaren Aussagen über die Daten gemacht werden können. Im Rahmen des Projekts wurden diese hauptsächlich zur Beurteilung der Laserdurchdringung in Wäldern angewendet.

### 4.3 Zusammenfassung

Alle die oben beschriebenen Prüfverfahren sind sehr hilfreich um Fehler bzw. Probleme bei den Höhenmodellen zu identifizieren. Jedes Prüfverfahren gibt einen Anhaltspunkt über die Qualität der Höhendaten. Die Lokalisierung der Fehler geschieht jedoch nicht automatisch und ist Aufgabe eines geschulten Operators. Dieser muss die Indizien interpretieren, welche ihm zur Verfügung stehen, dazu müssen sie zuerst kombiniert und mit anderen vorhandenen Geodaten verglichen werden. Der Operator beurteilt die Datenqualität und entscheidet, ob diese akzeptierbar sind oder nicht bzw., ob diese noch korrigiert werden müssen. Er informiert und bespricht jeweils die Fehler und deren möglichen Ursachen mit dem verantwortlichen Unternehmer. Pro Landeskarte 1:25'000 (210 km<sup>2</sup>) und Produkt braucht ein erfahrener Operator etwa drei bis vier Arbeitstage.





## 4.4 Benutzte Software

Wie bereits erwähnt, benutzt swisstopo für die Durchführung der Testprozeduren eine eigens geschriebene Software, die ,LWN-Check' gena nnt wird. Diese Software ermöglicht die gleichzeitige Kontrolle von DTM-AV/DOM Punk twolken und Gitterdaten. Die Mehrheit der Resultate der Prüfverfahren wird in Form von TIF-Bildern hera usgeschrieben und können somit problemlos in einem GIS interpretiert werden. Diese Software besteht aus einer Hauptroutine (in Perl geschrieben), die je nach Datensatz die nö tigen Nebenroutine (in C++ geschrieben) startet. Als GIS-Programm wird ArcGIS der Firma eingesetzt.

## 5 Gesammelte Erfahrungen aus der Verifikation und der Realisierung der Arbeiten

Aus der nunmehr sechs jährigen Praxis bei Leitung und Vergabe von Airborne Laserprojekten sowie der praktischen Erfahrung der Verifikation von ca. 35'000 km<sup>2</sup> Laserhöhendaten (DTM-AV und DOM) kann swisstopo folgende Erfahrungen und Schlussfolgerungen ziehen:

• Eine systematische, flächendeckende Überprüfung der Daten ist ein Muss.

Die Erfahrungen aus der zum Teil abgeschlossenen Verifikation zeigten, dass eine systematische und flächendeckende Kontrolle der Produkte DTM-AV und DOM unbedingt nötig ist. Die geographische Verteilung der Fehler war vom Zufall abhängig oder deren Lokalisierung anhand von statistischen Verfahren war kaum möglich. Trotz der ausgewiesenen Qualitätsmanagement-Erfahrung von den Airborne Laseranbietern, konnten verschiedene Mängel in den gelieferten Daten gefunden werden. Die Art der Fehler war sehr verschieden, angefangen von wenig gravierenden Filterung- und Klassifizierungsfehler, bis zu schwerwiegenden Problemen in der Kalibrierung der Flugstreifen und grösseren Lücken bei der Datenerfassung. Es ist aber zu bemerken, dass im Verlaufe der Zeit und mit der Erfahrung der Unternehmer die Fehlerquote massiv gesenkt wurde.

• Die Verifikation trägt wesentlich zur Qualität der Produkte bei.

Die Erfahrung zeigte, dass eine unabhängige von der Produktion getrennte Verifikation eine wesentliche Verbesserung der Produktqualität bewirkte. Die limitierte Erfahrung der Unternehmer bei Erfassung von Laserdaten der Schweizer Topografie führte am Anfang des Projektes zu schlechten und zum Teil unbrauchbaren Daten. Dank einer offenen Kommunikation mit Unternehmern über die Verifikationsverfahren und den eindeutigen Verifikationsresultaten konnte schlussendlich eine bessere Abstimmung zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer geschafft werden, was sich direkt in der Qualität der Produkte widerspiegelte.

• Der Verifikationsaufwand ist nicht unerheblich.

Der Aufwand für die Überprüfung von landesweit hergestellten Laserhöhendaten ist nicht zu unterschätzen und beansprucht viel Zeit und Ressourcen. Neben dem grossen Aufwand für den Aufbau der Infrastruktur sowie für die Verwaltung und Überprüfung von grossen anfallenden Datenmengen, beansprucht diese Art von Verifikation viel Personalaufwand. Die benötigte Zeit für die Berechnung der Prüfverfahren und die Zeit, die der Operator für die Datenkontrolle am Computer benötigt, ist nicht unwesentlich. Im Schnitt wird für die Verifikation einer 1:25'000 Landeskarte (210 km<sup>2</sup>) der Produkte DTM-AV und DOM etwa vier Arbeitstage gebraucht. Für die Verifikation dieser Daten sind drei Personen zu 100% bei der swisstopo beschäftigt. Es ist aber zu bemerken, dass der Verifikationsaufwand bei den letzten Etappen wesentlicher kleiner geworden ist.

• Die Verifikationsmethode ist nicht perfekt.

Die Verifikationsmethode ist noch verbesserbar. Die eingesetzten Methoden zeigten sich sehr effizient für die Beurteilung des DTM-AV bzw. der offenen Gebiete. Im Bereich DOM zeigte sich die Methode weniger effektiv, da sie kaum die Qualität der Laserpunkte auf Dachflächen zu beurteilen vermag. Ebenso zeigte sich die Methode ungenügend bei der systematischen Beurteilung der Lagegenauigkeit von erfassten Objekten. Schwierig war es auch die Qualität in

steilen Felsgebieten zu beurteilen. Eine unabhängige detaillierte Verifikation ruft auch die Gefahr hervor, dass die Unternehmer diese Aufgabe nicht mehr selber wahrnehmen und die Verantwortung der Qualität dem Auftraggeber überlassen. Bis heute wurden nur Gebiete unter 2000 m ü. M. berücksichtigt, in Zukunft sollen auch Daten im Hochgebirge erfasst werden, dazu muss das Verfahren sicherlich angepasst werden. Die Weiterentwicklung auf Stufe Hard- und Software ermöglicht es heute, eventuell auch eine Verifikation mit kommerziellen GIS-Lösungen durchzuführen.

## 6 Fazit

Swisstopo ist überzeugt, dass sich der investierte Aufwand bei der Datenverifikation gelohnt hat und in der Datenqualität widerspiegelt. Swisstopo ist sich aber bewusst, dass nicht jeder Auftraggeber die finanziellen Ressourcen und die Zeit für ein solches Verfahren hat, es kann jedoch allen empfohlen werden.

## Danksagung

Ein erster Dank geht an die Personen, die die Datenverifikation ermöglicht haben, d.h. Herr Laurent Berset, Herr Thomas Bigler, Herr Alexandre Gumy, Herr Handy Rusli, Herr Tumasch Flurin Schreich. Ein zweiter Dank geht an alle Unternehmer, die am Projekt mitgearbeitet haben und es nicht immer einfach hatten.

## Literaturverzeichnis

- Schenk T., 2001. Modelling and Recovering Systematic Errors in Airborne Laser Scanner, Proceedings of OEEPE workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for detailed Digital Elevation Models 1-3 March 2001. Royal Institute of Geodesy and Photogrammetry, 100 Stockholm, Sweden, March 2001.
- Scherer-Hertz, J., 2002. Digitale Geländemodelle in Bayern. DGM-Anwenderseminar. Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, Germany, September 2002.
- Schleyer, A., 2002. Baden-Württemberg auf dem Weg zu einem digitalen Geländemodell. DGM-Anwenderseminar. Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, Germany, September 2002.
- Vosselman, G and Maas, H.G., 2001. Adjustment and Filtering of Raw Laser Data Altimetry Data. Proceedings of OEEPE workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for detailed Digital Elevation Models 1-3 March 2001. Royal Institute of Geodesy and Ph0togrammetry, 100 Stockholm, Sweden, March 2001.
- Wouters, W. and Bollweg, A., 1998. AHN: Actual height model of The Netherlands a detailed elevation model using airborne laser altimetry. GeoInformatics, vol. 1, September 1998.

# Die Norm E DIN 18740-4 Anforderungen an digitale Luftbildkameras und an digitale Luftbilder

## RALF REULKE<sup>1</sup>, CHRISTOPH DÖRSTEL<sup>2</sup> & REINER SCHWEBEL<sup>3</sup>

Zusammenfassung: Digitale Luftbildkameras und digitale Luftbilder sind inzwischen von verschiedenen Anbietern in den Markt für Kameras und photogrammetrische Produkte eingeführt worden. Die entscheidenden Vorteile im Vergleich zu den konventionellen analogen Luftbildkameras sind ein erheblich besseres Signal-Rauschverhältnis, die zeitgleiche Erfassung multispektraler Daten in absoluten Strahldichteeinheiten, die schnelle Verfügbarkeit, sowie ein erhöhter Dynamikbereich von 12 bis 14 Bit pro Pixel.

Diesen Vorteilen steht eine Vielzahl von neuen Problemen gegenüber. So haben sich bestimmte Aufnahme- und Qualitätskriterien geändert. Demzufolge müssen Qualitätsund Abnahmekriterien neu definiert werden. Hinzu kommen neue Aufnahmetechnologien z.B. mit Zeilensensoren.

In diesem Beitrag werden grundlegende Vorstellungen der DIN 18740-4 "Anforderungen an digitale Luftbildkameras und digitale Messbilder" vorgestellt. Hierbei werden das Spannungsfeld von der Einzelflächenkamera über die Multisensorkamera bis hin zum Zeilensensor betrachtet und die grundlegenden Anforderungen an Kameras und Bilder definiert. Die für ein Bildflugprojekt maßgeblichen Parameter und Qualitätskriterien werden in einer Spezifikation festgelegt und Prüfverfahren zur Verifizierung der Qualitätsanforderungen vorgeschlagen.

Der beschriebene Normentwurf ist Teil der vom DIN-Arbeitsausschuss "Photogrammetrie und Fernerkundung" erarbeitete Normreihe 18740 "Photogrammetrische Produkte".

## 1 Einleitung

Der DIN Arbeitsausschuss "Photogrammetrie und Fernerkundung" beschäftigt sich seit 2003 mit der Problematik der digitalen Kameras in der Luftbildphotogrammetrie. Erste Ergebnisse dieser Normungsarbeit wurden in (DOERSTEL, 2004) veröffentlicht. Man war sich dabei der Problematik bewusst, dass sich digitale Kameras noch in der Entwicklung befinden und noch kein De-facto-Standard existiert. Hinzu kommen unterschiedliche Aufnahmeprinzipien (z.B. Zeilenkamera und Flächenkamera). Um jedoch zu einem frühen Zeitpunkt dem Anwender die Kriterien zur Entscheidungsfindung für eine Systembeschaffungen und Qualitätsstandards für das Endprodukt - Digitales Photogrammetrisches Bild - geben zu können, wurde das Normprojekt "Anforderungen an das digitale Luftbild" in Angriff genommen. Der Normentwurf ist

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Prof. Dr. Ralf Reulke, Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Informatik, Computer Vision, Unter den Linden 6, 10099 Berlin, e-mail: reulke@informatik.hu-berlin.de

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Dipl. Ing. Christoph Dörstel, Intergraph GmbH, Ulmerstr 124, 73431 Aalen, e-mail: christoph.doerstel@intergraph.com

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Prof. Dr.- Ing. Reiner Schwebel, Reuchlinstr. 32, 73431 Aalen, e-mail: reiner.schwebel@t-online.de

inzwischen erhältlich (BEUTH, 2006). Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit ausgewählten Schwerpunkten dieser Norm.

# 2 Die Normenreihe 18740

Der hier vorgestellte Normentwurf für digitale photogrammetrische Bilder, hergestellt mit digitalen Luftbildkameras, ist der vierte Teil der neuen Normreihe 18740 "Photogrammetrische Produkte". Ziel der Normreihe ist es, für die wichtigsten photogrammetrischern Kernprodukte Qualitätsstandards zu erstellen. Als Kernprodukte gelten hier unverarbeitete und verarbeitete bildhafte Informationen, also analoge und digitale Bilder sowie digitale Orthophotos. Die Normreihe konzentriert sich auf messtechnisch verwertbare Luftbilder, da diese den wesentlichen kommerziellen Bereich der praktischen Photogrammetrie ausmachen und umfasst:

Teil 1 – "Anforderungen an Bildflug und analoge Luftbilder" (Norm November 2001)

- Teil 2 "Anforderungen an das gescannte Luftbild" (Normentwurf Mai 2004)
- Teil 3 "Anforderungen an das Orthophoto" (Norm Oktober 2003)

Teil 4 – "Anforderungen an das digitale Luftbild" (Normentwurf , )

Eine Kurzbeschreibung der Normteile 1, 2 und 3 und die zugehörigen Formblätter für die Projektspezifikationen sind im Internet unter <u>www.dgpf.de</u> im Bereich Normungsvorhaben aufgeführt.

Das Konzept der Normreihe enthält:

- grundsätzliche Anforderungen an Verfahren und Produkte
- projektspezifische Parameter und Qualitätskriterien

Es bietet dem Anwender ein umfassendes und flexibles Werkzeug zur Qualitätsplanung und Qualitätssicherung.

Normen gelten nicht per Gesetz, sondern auf Grund von Verwaltungsvorschriften oder von Verträgen zwischen Auftraggebern und Auftragnehmern. Dabei können Normen nicht nur als Ganzes, sondern auch Teile davon zur Anwendung kommen

# 3 Stand der Technik

Seit dem Jahr 2000 stehen digitale photogrammetrische Kamerasysteme zur Verfügung, die in der Lage sind, herkömmliche filmbasierte Kameras abzulösen. Damit wird der schon lange vorhandene digitale Auswerteansatz auf photogrammetrische Arbeitsstationen mit der digitalen Aufnahme verbunden.

Photogrammetrische Kameras bedeutet hier, dass neben der hohen Auflösung und einer großen Schwadbreite auch eine ausreichende Genauigkeit der Kalibrierung und der Lagemessung gewährleistet ist, um damit den heute üblichen Scanprozess von Filmvorlagen, gewonnen aus Aufnahmen der filmbasierten Luftbildmesskammern, überflüssig zu machen.

Inzwischen kann man davon ausgehen, dass die räumliche Auflösung und die erzielte Genauigkeit digitaler Kamerasysteme vergleichbar mit denen der klassischen Ansätzen ist. Entscheidender Unterschied zu den analogen photobasierten Aufnahmesystemen ist das signifikant bessere Signal zu Rausch Verhältnis (SNR) und die absolute Radiometrie der panchromatischen und multispektralen Kanäle.

Das entscheidende Problem besteht darin, gleichzeitig eine hohe räumliche Auflösung und eine große Schwadbreite (aus Sicht der Flugökonomie) zu erzielen. Prinzipiell stehen zwei Sensortechnologien zur Verfügung – die matrixbasierten und die zeilenbasierten Aufnahmesysteme.

Während Matrixsysteme auf eine stabile Geometrie verweisen können, haben Zeilensysteme den Vorteil, mit einem Detektorarray den gesamten Aufnahmebereich zu erfassen. Im Folgenden sollen an Beispielen die wesentlichen Kameratechnologien erläutert werden (Abbildung 1).

Da keine ausreichend großen flächenhaften Detektorarrays zur Verfügung stehen, muss bei matrixbasierten Systemen ein Bild aus mehreren Detektorflächen zusammengesetzt werden. Das Problem besteht darin, die Detektoren lückenlos aneinander zu fügen. Dafür wurden technologisch zwei Ansätze umgesetzt. Die Digital Mapping Camera (DMC) von ZI-Imaging kippt die einzelnen Sensorflächen zueinander und löst die Bilder zeitsynchron aus (HINZ, 2000, DÖRSTEL, 2003). Die UltraCam von Vexcel verwendet 9 Flächenarrays auf 4 Fokalebenen (LEBERL, 2003). Die entstehenden Lücken auf der zentralen Fokalebene werden dadurch geschlossen, dass entsprechend der Fluggeschwindigkeit die verbleibenden Arrays so ausgelöst werden, dass lediglich ein Projektionszentrum einer virtuellen Fokalebene entsteht.



Abb. 1: ADS40 (Leica), DMC (ZI-Imaging), UltraCam (Vexcel)

Als zeilenbasiertes System ist die ADS 40 der Firma Leica realisiert worden (SANDAU, 2000, REULKE, 2003). Der Vorteil ist die große Schwadbreite sowie die Verwendung nur einer Optik für alle Zeilen. Der Nachteil ist die aufwendige Messung der äußeren Orientierung mittels einer inertialen Messeinheiten (IMU) und das bestimmte Produkte (zum Beispiel die Kombination von RGB und NIR-Kanälen) erst auf Othophotobasis entstehen können. Vorteilhaft ist allerdings, dass die Auflösung der multispektralen Kanäle vergleichbar zu dem des panchromatischen Kanal ist.

Generell gelten für zeilen- und flächenbasierte digitale Kamerasysteme, dass die Benutzer nicht die originalen Aufnahmeinformationen erhalten. Um aus den Rohbilddaten geeignete Bilder für die photogrammetrischen Weiterverarbeitungsprozesse zu generieren werden die Daten sowohl radiometrisch nachbearbeitet als auch geometrisch umgebildet. Dies erfolgt mit Bildverarbeitungsmethoden in einem so genannten "Post-Processing-Schritt".

# 4 Normentwurf 18740-4

Ein photographischer Film weist eine Reihe von Unterschieden im Vergleich zu den eingesetzten CCD-Detektoren auf. Demzufolge können die Anforderungen an gescannte Bilder nicht direkt auf die digital erfassten Bildinformationen übertragen werden. Die Art und Weise des Verständnisses und der Beschreibung der Bildentstehung und der Verarbeitung unterscheidet sich. Eine adäquate Darstellung findet sich z.B. in (JAHN, 1996). Der Anwendungsbereich dieser Norm bezieht sich auf digitale Luftbilder, die mittels digitaler Messkameras hergestellt werden und messtechnischen Ansprüchen genügen.

Normative Verweisungen beziehen sich auf die Vorgängerreihen DIN 18716 (Photogrammetrie und Fernerkundung) und DIN 18740 (Photogrammetrische Produkte). Außerdem werden eine Reihe anderer Vorschriften zitiert, zum Beispiel DIN EN ISO 9000 (Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe) und ISO 7137 (Aircraft - Environmental conditions and test procedures for airborne equipment).

In der Sammlung von Begriffen wird versucht, begriffliche Unstimmigkeiten, die in dem heutigen Sprachgebrauch enthalten sind, aufzulösen. So wird zum Beispiel zwischen Sensor und Detektor unterschieden. Sensor ist hier das Instrument, das letztendlich das Bild erzeugt und Detektor der Strahlungsempfänger, als Bauteil dieses Sensors. Außerdem werden die Auflösungsbegriffe, wie zum Beispiel geometrische Auflösung und Bodenauflösung diskutiert.

Der Normentwurf zur DIN - 18740-4 "Anforderungen an digitale Luftbildkameras und digitale Messbilder" behandelt drei Schwerpunktthemen, die im Weiteren kurz vorgestellt werden:

- Digitale Luftbildmesskamera;
- Bildflug;
- Digitales Luftbild.

Ergänzend dazu werden in einem Anhang die Spezifikation für ein Bildflugprojekt mit digitaler Kamera und ein Beispiel für die Spezifikation eines Bildflugprojektes beschrieben. Die Norm wird so gestaltet, dass entsprechend der Anwendung Spielraum für die Festlegung von Qualitätsanforderungen und besonderer Projektparameter gegeben ist.

## 4.1 Anforderungen an die digitale Luftbildmesskamera

Die Kamera wird als System aufgefasst und enthält damit auch die Plattform, Belichtungsund Bildwanderungsausgleich, das optische System, Detektor und Signalverarbeitung, sowie Steuerung und Speicherung. Hinzu kommen grundlegende Anforderungen an die Umweltbedingungen.

Die grundlegende Anforderung an die Kamera und deren Komponenten ist zunächst etwa die Fähigkeit stereophotogrammetrisch ausmessbare und der Anwendung entsprechend spektral klassifizierbare und farbgetreue Bilder erzeugen zu können.

Gewöhnlich werden Multispektralkanäle mit geringerer Auflösung als der panchromatische Kanal aufgenommen. Deshalb muss das Farbbild durch Pan-Sharpening Verfahren in derselben Auflösung wie das hochaufgelöste panchromatische Bild erstellt werden. Offensichtlich gibt es Grenzen bei diesen Verfahren. Die DIN schlägt vor, dass das Verhältnis der Kantenlängen der Bodenpixel (Multispektral zu PAN) das Verhältnis von 5:1 nicht überschreiten darf.

Das optische Auflösungsvermögen orientiert sich am Abtasttheorem (JAHN, 1996) und sollte den Wert 1000/(2 • Pixelabstand) in [ $\mu$ m] haben. Die Signalverarbeitung muss typische Effekte von CCD-Detektorarrays berücksichtigen (PRNU und DSNU-Korrektur). Im Rahmen einer Messkampagne entstehen Datenmengen, an denen sich die Mindestspeichergröße für Bild- und Metadaten orientieren muss, die im Bereich von 1 TB liegt.

Ein wichtiger Punkt ist die Kamerakalibration, die neben der klassischen geometrischen Kalibration auch eine radiometrische enthalten muss. Die radiometrischen Eigenschaften der Sensoren müssen absolut in Strahldichteeinheiten angegeben werden. Im Unterschied zu analogen photographischen Kameras ermöglichen digitale Systeme eine reproduzierbare Messung von Grauwerten, wenn der gemessene Grauwert mit physikalisch relevanten Umgebungsparametern in Verbindung gebracht wird. Sie enthält außerdem die Dunkelstromkorrektur (DSNU, Dark Signal Non Uniformity), eine Kalibrierung der pixelabhängigen Empfindlichkeit (PRNU, Pixel Response Non Uniformity), sowie eine Korrektur des Randabfalls.

Essentiell, insbesondere für Zeilenkameras, sind die Systeme für die Positions- und Neigungsbestimmung. Dazu werden GNSS (Global Navigation Satellite System) mit differentielle Messung eingesetzt. Außerdem muss insbesondere für Zeilensysteme ein System zur direkten Neigungsbestimmung mittels eines inertialen Messsystems (IMU) eingesetzt werden.

# 4.2 Anforderungen an Bildflüge mit digitalen Kameras

Die Anforderungen an den Bildflug beziehen sich teilweise auf die Norm 18740-1 "Anforderungen an Bildflug und analoges Luftbild" (DIN, 2001). Sie ist um Abschnitte wie geometrische Auflösung und radiometrische Dynamik sowie um die Definition geeigneter Abtastmuster ergänzt, die bei Verwendung digitaler Systeme bestimmend für die Produktqualität sind.

Ebenso wird in dieser Norm der Begriff der Bodenauflösung eingeführt, da die bisherige Angabe einer Bildmaßstabszahl im digitalen Bild an Bedeutung verloren hat. Ursache sind unterschiedliche Brennweiten und Pixelabstände der verschiedenen Sensoren. Dieser Umstand ist auch für die durchgängige Beurteilung der Bildqualität sinnvoll, denn die im Orthophoto geforderte Bodenauflösung kann nun für den Bildflug direkt geplant oder entsprechend berücksichtigt werden.

## 4.3 Anforderungen an das digitale Luftbild

Entsprechend der Bearbeitung der digitalen Daten, werden unterschiedliche Produkte unterschieden.

Als digitales Originalbild werden die aus dem Detektor ausgelesenen, digitalisierten und abgespeicherten Daten bezeichnet. Das digitale Messbild enthält bereits die innere Orientierung und wird aus dem Originalbildern abgeleiteten; wobei seine Bildebene ist auf eine einheitliche Fläche bezogen ist. Die Parameter für das Messbild werden im Anhang A beschrieben.

Weitere Punkte sind Speicherung und Dokumentation, sowie Kompression. Die Kompression der Bilddaten kann ohne Verluste aber auch mit verlustbehafteten Verfahren erfolgen. Die DIN empfiehlt eine Kompression ohne Verluste, wenn die endgültige Verwendung der Daten vor dem Flug nicht bekannt sein sollte.

Die zusätzliche Information zur Aufnahme und den Bilddaten wird in einem Abschnitt über Metadaten behandelt.

## 4.4 Anhang

Der Anhang enthält eine Spezifikation für Bildflugprojekt mit digitaler Kamera und Beispiel für die Spezifikation eines Bildfluges mit digitaler Kamera. Der Nutzer bekommt damit eine Vorlage über die Verwendung der spezifischen Parameter für Luftbildprojekte.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In dem vorliegenden Paper wird der Normentwurf für digitale photogrammetrische Luftbildkameras und digitale Luftbilder vorgestellt. Hierbei werden die 3 Hauptkapitel jeweils durch Beschreibung der Besonderheiten der neuen digitalen Luftbildkameras vertieft. Besonders wird auf die erweiterten radiometrischen und veränderten abbildenden Eigenschaften der neunen digitalen Sensoren eingegangen.

Die Mitarbeiter im Arbeitskreis "Photogrammetrie und Fernerkundung" haben einen Entwurf für eine DIN erarbeitet. Einsprüche sind willkommen und können bis zum 30. September 2006 eingereicht werden.

## 6 Literaturverzeichnis

BEUTH, 2006: http://www.beuth.de/langanzeige/din%2018740-4/89887977.html

- CRAMER, M., 2004: EUROSDR NETWORK ON DIGITAL CAMERA CALIBRATION, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing – Congress 2004 – Istanbul, noch zu veröffentlichen
- DIN, 2001: E DIN 18740-1 Photogrammetrische Produkte Teil 1 Anforderungen an Bildflug und analoges Luftbild - Beuth-Verlag, Berlin
- DÖRSTEL, C.; REULKE, RALF & SCHWEBEL, R. (2004): Berücksichtigung digitaler Kameras im neuen Normentwurf E DIN 18740-4. 24. DGPF-Jahrestagung, Halle (Deutschland), 2004-09-15 - 2004-09-17
- DÖRSTEL, C., JACOBSEN, K. & STALLMANN, D., 2003: DMC Photogrammetric accuracy Calibration aspects and Generation of synthetic DMC images, Eds. M. Baltsavias / A. Grün, Optical 3D Sensor Workshop, Zürich
- JAHN, H. & REULKE, R. ; Systemtheoretische Grundlagen optoelektronischer Sensoren; Akademie Verlag, Berlin, 1995
- HINZ, A., DÖRSTEL, C. & HEIER, H., 2000: Digital Modular Camera: System Concept and Data Processing Workflow", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B2. pp. 164
- LEBERL, F. & GRUBER, M., 2003: Economical Large Format Aerial Digital Camera, GIM International, June 2003
- REULKE, R., 2003: Design and Application of High-Resolution Imaging Systems, GIS Geo-Informationssysteme, Vol 3/2003, p. 30-37
- SANDAU, R. BRAUNECKER, B., DRIESCHER, H., ECKARDT, A., HILBERT, S., HUTTON, J., KIR-CHOFER, W., LITHOPOULOS, E., REULKE, R. & WICKI, S., 2000: Principles of the LH SYSTEMS ADS40 Airborne Digital Sensor, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B1. Amsterdam 2000, pp.258
- ZEITLER, W., DÖRSTEL, C. & JACOBSEN, K., 2002: Geometric calibration of the DMC: Method and Results, Proceedings ASPRS, Com. 1, Denver, USA.

# Modeling fractional shrub/tree cover and multi-temporal changes using high-resolution digital surface models and CIR-aerial images

### E. BALTSAVIAS<sup>\*,1</sup>, H. EISENBEISS<sup>1</sup>, D. AKCA<sup>1</sup>, L.T.WASER<sup>2</sup>, M. KÜCHLER<sup>2</sup>, C. GINZLER<sup>2</sup> & P.THEE<sup>2</sup>

Abstract: The objective of this paper is to assess increase and decrease of forest area and estimate shrub encroachment between 1997 and 2002 in open mire land using CIR-aerial images, DSMs derived from it and LiDAR data. The present study was carried out in the framework of the Swiss Mire Protection Program, where changes of forest area are a key issue. The study area is located in the Pre-alpine zone of Central Switzerland. In a first step, high-quality DSMs were automatically generated from CIR- aerial images of 1997 and 2002. This DSM generation is based on high accuracy, intelligent matching methods developed at ETHZ which are able to produce very dense and detailed DSMs that allow a good 3D modeling of both deciduous and coniferous trees and shrubs, and multi-temporal analysis of their growth pattern. In a second step, tree layers from both years were then generated combining canopy height models derived from the DSMs and LiDAR DTM with a fuzzy classification of spectral information (NDVI) of CIR aerial images. In a third step, on the basis of these tree layers fractional tree/shrub covers were generated using explanatory variables derived from the DSMs and logistic regression models. Finally, bias was estimated by analyzing the distribution of the fractional model differences. The corrected models reveal a decrease of tree/shrub probability. This indicates a decrease of forest and other wooded areas between 1997 and 2002. On the other side, the models also indicate real shrub encroachment and tree growth in open mire land. The study stresses the importance of high-resolution and high-quality DSMs and highlights the potential of fractional covers for ecological modeling.

## 1 Introduction

This study focuses on assessing in crease and decrease of tree / shrub area in a mire ecosystem between 1997 and 2002. The study was carried out in the framework of the Swiss Mire Protection Program which aims at conserving mire ecosys tems of national importance and outstanding beauty in their present state. This implies no de crease of the mire area and no degradation of vegetation. A monitoring program based on a representative sample of 130 mires was set up in 1996 to examine the effectivenes s of the conservation status (K ÜCHLER et al., 2004). Since changes of the extent of forests as well as shrub encroachment may alter a sensitive mire biotope, detection and evaluation of increase and decrease of the entire wooded area is indispensable and may help for preservation of these biotopes.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, 8093 Zurich, Switzerland

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Swiss Federal Research Institute WSL, Department of Landscape Inventories, 8903 Birmensdorf, Switzerland

<sup>\*</sup> Corresponding author.
Using traditional methods of field survey or ae rial photograph interpretation to gain information on shrub encroachment and tr ee growth etc. is not fea sible for larg er monitoring programs regarding costs and time (ST-ONGE & ACHAICHIA, 2001; WATT & DONOGHUE, 2005). Recent progress in three-dimensional remote sensi ng e.g. digital stereophotogrammetry, radar interferometry and LiDAR (HYYPPÄ et al., 2000) in combination with high resolution images may be helpful to estimate increase and decrease of forest area and occurrence of shrubs. Some studies suggest the use of canopy height models to detect change s in the forest stands (S CHARDT et al., 2002; NAESSET & GOBAKKEN, 2005) and to evaluate growth estimations (including extent of forest area and shrub encroachment). Canopy height models can be calculated by subtracting a digital terrain model (DTM) from a digital su rface model (DSM). DS Ms can be generated automatically by image matching methods, whereby most commerci al packages use crosscorrelation or matching of interest points. Meanwhile, several LiDA R systems enable the derivation of DSMs and DTMs (H YYPPÄ et al., 2000; B ALTSAVIAS, 1999). There is a growing need for sensitive tools to predict spatial and te mporal patterns of plant species or communities (KIENAST et al., 1996). Spatially explicit predicti ve modeling of vegetation is often used to construct current vegetation cover using informa tion on the relations between current vegetation structure and various environmental attributes (GRÜNIG et al., 2004). Some st udies point out that modern regression approaches have proven particularly useful for modeling spatial distribution of plant species and communities (G UISAN & ZIMMERMANN, 2000; SCOTT et al., 2002). Since old CIR aerial images are often available and necessary variables of the DSM can be calcul ated, retrospective analysis of changes in forest area and shrub/tree encroachment in a mire biotope is feasible. Thus, airborne remote sensing data in combination with generalized linear models (GLM) could be useful for modeling these changes in mire ecosystems over time.

The objective of the present study is to assess decrease and increase of forest tree / shrub area in a mire ecosystem between 1997 and 2002 using logistic regression models, aer ial images and DSMs derived from it. A fracti onal cover approach seem to be mor e appropriate since the discrimination of tree covers (M ATHYS et al., 2006) into simple for rest / non-forest categories results in a loss of informatio n. The resulting shrub/tree cover r maps contain the fraction of shrub/tree as a continuous var iable and can be adapted easily and consist tently to a range of protecting purposes as applied in the Swiss Mire Protection Program.

### 2 Materials and methods

#### 2.1 Study area

Models have been developed and tested for the mire "Walchwil/Oberallmig" which is located on a small plateau in the East of Lake of Zug in the Pre-alpine zone of Central Switzerland (approx. 47°07' N and 8°32' E). The mire site covers an area of approx. 4.2 km<sup>2</sup>, whereas the core of the mire has an area of approx. 2.61 km<sup>2</sup>. The altitude varies from 900 m to 1000 m above sea level. The landscape is highly fragmented and characterized by pastures that are crossed by shrubs and bright broad-leafed woodland (see Fig. 1). The edominant vegetation types are moist and wet meadows and pastures, low sedge poor fen, bog forest and broad-leaved woodland and willow Carr. The most relevant change s (1997-2002) for the present st udy are namely storm losses

caused by hurricane Lothar (1999), a permanent shrub encroachment in open mire land and selective logging activities and cutting of shrubs as a result of conservation efforts.



Figure 1. Left side: overview of the test site (Pixelmap © 2006 Swisstopo JD052552); right side: bog and fenland, coniferous and deciduous trees and shrubs.

### 2.2 Remotely sensed data

Three different sets of input data are used: 1. Image data: consist of 4 CIR aerial images (1 strip) of 1997 and 12 CIR aerial images (2 strips) of 2002, scale 1:10000 and 1:5700, respectively and orthoimages that were generated with a spatial resolution of 0.5 m. 2. Digital surface models: DSMs were generated automatic ally from the above images of the years 19 97 and 2002, respectively with a spatial resolution of 0.5 m. 3. National LiDAR data of the Swiss Federal Office of Topography (SWISSTOPO) was acquired in 2001 with le aves-off. From the raw data, both a DTM and DSM are genera ted by SWISSTOPO (as raw irregularly distributed points and regular grid; the first dataset was used in this study). The LiDAR DTM had an aver age point density of 0.8 points /  $m^2$  and height accuracy (1 sigma) of 0.5 m. The DTM was interpolated to a regular grid with 0.5 m grid spacing for reasons explained below.

### 2.3 Automatic generation of digital surface models

Since accurate surface information in forested a nd open mire land is very important for this modeling approach, high-resolution DSMs of 1997 and 2002 are indi spensable. Thus, a matching method which is described in detail in (ZHANG, 2005) was used. This method can simultaneously use any number of images (> 2), matches very densely various primitives (grid points, feature points with good texture and edges), uses geometrical constraints to restrict the search space, combines two matching algorithms (sum of modified cross-correlation, and least squares matching) to achieve speed but also higher accuracy if needed, combines the matching results of the three primitive types with another matching approach to ensure local consistency, and performs an automatic blunder detection. The matching method is implemented in the operational, quasi-complete photogrammetric processing package Sa t-PP which supports satellite and aerial sensors with frame and linear array geometry. The result was a regular grid DSM with 0.5 m spacing which was interpolated from a matching point cloud of si milar density (c.a. 15 million

match points per stereo-pair). Visual inspection revealed that vegetation surface was best modeled with the blue channel.

### 2.4 Co-registration

The matching DSMs of 1997 a nd 2002, and the LiDAR DTM were co-registered, using a point cloud co-registration procedure described in ( GRUEN & AKCA, 2005). This co-registration uses a 7-parameter 3D s imilarity transformation to remove systematic differences (bias) between two datasets, e.g. due to di fferent image orientation. For the estimation of these parameters, we used control surfaces, i.e. DSM parts that did not change in the two datasets, i.e. bare ground, and also removed large differences due to matching errors with a robust filtering. After co-registration, different products could be generated and conclusions drawn. The difference 2002-1997 matching DSM gives the changes between the two epochs, especially regarding vegetation. After co-registration, the Z-component of the Euclidian distances (sigma a posteriori) was 3.4 m, showing a clear reduction of trees and other r wooded plants from 1997 to 2002. The difference matching DSMs minus LiDAR DTM gives the normalized DSMs (nDSM), i.e. the 3D objects in the scene and especially the canopy height models (Fig. 2).



## 2.5 Tree layers

In this study, two tree layers serve as basis (response variab le) for the fractional modeling approach. Preliminary tree covers were calculated using the canopy height models of both epochs. In a first step, woody areas were ex tracted according to the 3m height definition of a tree in the National Forest Inventory.

In a second step, non- tree objects (buildings, rocks etc.) of the canopy covers were removed by using spectral information of the CIR orthoimages (normalized difference vegetation index and a

green index). Non-tree objects have low NDVI and green index valu es. In former tests, non-tree objects were removed using a multi-resolution segmentation of the canopy cover and CIR-orthoimages and a fuzzy classification using eC ognition which revealed similar results but was more time-consuming. The resulting tree layers of 1997 and 2002 (*tree\_layer97* and *tree\_layer02*) are a product of canopy model pixe ls with height values more than 3m and high NDVI and green index values.

### 2.6 Fractional tree/shrub covers

Logistic regression is often us ed to predict probabilities for presence/absence of a specifi c vegetation type at each point (T ONER & KEDDY, 1997). Shrub/tree occurrence maps can be constructed by analysis of these probabilities' actual occurrence. The logistic regression model is a special case of t he generalized linear model (GLM) and is ad apted for modeling such data (MCCULLAGH & NELDER, 1983). The result is a fr actional tree/shrub cover, i.e. a probability for each pixel to belong to the class "tree/shrub". The training data for the m odel were selected in a way to enable estimation of bias: only pixels were used which belo ng to the same class in both surveys, i.e. that were either corresponding forest pixels or open land pixels in the 1997 and 2002 tree layers. The explanatory variables consist of five commonly used topographic parameters derived from normalized DSMs (sl ope, aspect, curvature, and lo cal neighboring functions), see Table 1. Most of these parameters have suc cessfully been applied for ecol ogical modeling purposes in mires (KÜCHLER et al., 2004) or in biodiversity studies (W ALSER et al., 2007). Two fractional tree/shrub covers of 1997 and 2002 respectively were produced using the tree layers described in section 2.5.

Name	Derivation
curvature	curvature of the surface at each cell center (3x3 window)
plan	curvature of the surface perpendicular to the slope direction, referred to as the planform curvature (3x3 window)
prof	rate of change of slope for each cell, curvature of the surface in the direction of slope (3x3 window)
slope	rate of maximum change in z value from each cell
top	assessment of topographic position (4 classes: ridge, slope, toe slope and bottom), the resulting grid displays the most extreme deviations from a homogenous surface

Table 1. Overview of the five explanatory variables (derived from the nDSMs) as used to generate the fractional shrub/tree covers.

### 2.7 Bias estimation

COPPIN et al. (2004) and L  $\cup$  et al. (2004) present various change detection algorithms and techniques in ecosystem monitoring. E.g. ideally one would like to use imagery fr om the same sensor to keep the sensor character ristics as consistent as possible. It should be noted that even using imagery from the same sensor is no guarantee that the sensor characteristics will be equal. Therefore, a possible bias may result from different data quality of the CIR aerial images from the two survey times, e.g. different spatial resolution, different image s canning facilities, varying radiation, different acquisition data (different st atus of phenology of trees and shrubs) etc. In the context of predictive modeling, bias denotes a systematic error in predicted values which might be

misinterpreted as a change. A method of estimating bias arising from different data quality in two surveys is presented in KÜCHLER et al. (in press).

In the present study, bias was estimated by the following procedure: The probabilities of each pixel of the corresponding smoothed fractional cover (i.e. *model\_uncorr*) were added together and the sums stratified into 20 classes. The lowest class (0.0 - 0.1) of model sums corresponds to "non-tree/shrub" whereas the highest class (1.9 - 2.0) corresponds to "tree/forest". Intermediate classes represent either partly forested areas or areas that have been deforested or areas where shrub encroachment occurred (Fig. 3). To estima te bias, the smoothed fractional covers (2002 - 1997) were subtracted. Then, dist ributions of the resulting differences were analyzed separat ely within each of the 20 classes. As a result, discrete bias est imations for each class were obtained (Fig. 3). To have a continuous bias estimation, the discrete values were smoothed by Loess regression with span 0.3.



Figure 3. Mean differences, bias (estimated by modus) and corrected differences of smoothed fractional tree/shrub covers for 20 classes of model sums. Lowest class (0.0 - 0.1) of model sums corresponds to "non-tree/shrub", whereas the highest class (1.9 - 2.0) corresponds to "forest". Intermediate classes represent either partly forested area or areas that have been deforested or areas where shrub encroachment occurred.

#### 2.8 Ground truth

For validation purposes ground truth data was produced using four types of samples (4 x 40) that were digitized from the stereo aerial images: 1. Tree/shrub-less areas in both years 1997 and 2002 (equal vegetation), 2. T ree/shrub areas in both years 1997 and 2002 (equal vegetation), 3. Tree/shrub-less areas of 2002 that belonged to tree/shrubs in 1997 (vegetation decrease), 4. Tree/shrub-less areas in 1997 that are covered with trees/shrubs in 2002 (vegetation increase).

## 3 Results

Fig. 4 a-d visualizes the difference between the tree layers and fractional covers of both years in a typical part of the mire wher e small shrubs and single trees are well pre sent. The tree area extracted by both data sets is  $0.901 \text{km}^2$  (*tree\_layer97*) and  $0.832 \text{km}^2$  (*tree\_layer02*), respectively. Visual image inspection revealed that several shr ubs and small single tree s are still not extracted in the remaining open mire land. Therefore, two fractional tree/shrub covers of 1997 and 2002 were produced using the tree layers described in section 2.5 as training data sets. A tree/shrub cover stratum of e.g. 0.1 - 1 (10-100%) means, that all pixels with a proba bility higher than 10% are assigned to shrub/tree etc. Fi g. 4c-d) shows the five predicted tree/shrub c over strata for a typical part of the mire. Tree/shrub area that is previously missed by the tree layers is extracted as well – dependent on the threshold of probability. The area of extracted trees/shrubs increases with lower probability thresholds. At the same time, errors increase too. E.g. visual stereo i mage analysis revealed that a cover stratum of 10-100% also consider s other vegetation than shrubs such as tall grass or herbs. In contrary, considering only a cove r stratum of 0.5 - 1.0 (50-100%) leads to a significant underestimation of shrubs and trees in the open mire land.



Figure 4. a) CIR orthoimages with tree layers of 1997 and b) of 2002, c) and d) corresponding fractional tree/shrub covers. The two smaller circles mark tree growth and shrub encroachment. The large circle marks areas with decreased tree/shrub cover due to selective logging activities.

Decrease and increase of forest area and other wooded area (1997-2002) is given in Table 2. The tree layer97 02 reveals a decrease of tree/shrub pixel portion of -0.059 between 1997 and 2002.

Overall, the fractional cover approach revealed a decrease of tree/shrub probability between 1997 and 2002 of -0.029 for the uncorrected model (including bias) and -0.037 for the corrected model. Table 3 summarizes the changes of tree/shrub pixel portion between 1997 and 2002 on the digitized sample areas be tween the tree layers and the change s of tree/shrub probability of the corrected fractional covers. Both the tree laye rs and fractional tree/s hrub covers reveal no decrease/increase between 1997 and 2002 on the digitized samples where no change occurred. Tree layer and corrected model show a substantial decrease of tree/shrub probability in delineated areas where tree/shrub area declined between 1997 and 2002. Good information on deforestation is also given by tree layer97 02. However, shrub encroachment and growth of small trees in open mire land is not or only slightly detected when using the tree layer (+0.081). In contrary, the corrected model (+0.178) shows a shrub encroachment (general increase of tree/shrub probability in areas that were delineated as increase).

Table 2. Variations of change estimations for tree/shrub probability (1997-2002) as obtained by different methods.

Differences 2002 - 1997	Description	Mean change of tree/shrub pixel portion
tree_layer97_02	tree layers 2002 - 1997	-0.059
		Mean difference of tree probability
Model_uncorr	based on tree layers	-0.029
(not bias corrected)		
Model_corr	based on tree layers	-0.037
(bias corrected)		

Table 3. Mean differences in tree/shrub probability (2002-1997) on the digitized sample areas.

digitized as	Mean change of tree/shrub pixel portion
decrease	-0.602
equal	-0.000
increase	+0.081
	Mean difference of tree/shrub probability
decrease	-0.518
equal	-0.000
increase	+0.178
	decrease equal increase decrease equal increase

## 4 Discussion and conclusions

Combining remote sensing data with regression analysis and fractional cover approaches as it is performed in many studies for land cover mapping (M ATHYS et al., 2006) is also shown to be appropriate for fractional tree/shrub cover mapping and assessing changes of forest area in a mire biotope. The usage of st andard explanatory variables as already applied in other studies (KUCHLER et al., 2004) derive d from the normalized DSM proved to be a good approach for fractional modeling. With a fracti onal cover approach, also subtle changes of forest t and other wooded areas can be detected before reaching a discrete threshold value. Furthermore, shrub/tree classifications based on the contin uous data can be adjusted retrospectively. This may be an

advantage also for mire habitat management. However, different quality of the scanned CIR aerial images and the normalized DSMs from the two surveys 1997 and 2002 caused systematic errors in the predicted values of the models which could be mis interpreted as a change of for est area. In fact, bias proved to occur at a scale which w ould, without correction, make impossible for example a reproducible statement whether the removal of trees and shrubs or the encroachment by growing bushes was predo minant in the s urvey time. Estimation and corr ection for bias i s essential, if any change has to be assessed by statistical modeling.

Overall, the present study reveals a decrease of forest and other wooded areas since 1997 although shrub encroachment occurred in some parts of open mire land. T his general decrease has two reasons: 1) most fores t clearings in this region were caused by hurricane Lothar in 1999 and 2) selective logging of groups of trees, single trees, shrubs in open mire land in the framework of the regeneration program. These differences of the corrected fractional tree/shrub covers give us reliable indication of the magnitude of change s of tree area between 1997 and 2002. Information on shrub encroachment is essential for assessing possible impact on the mire environment. Future work will also pursue the retrieva 1 of the type of trees/shrubs by using spectral information of ADS40 data or Ultracam data.

However, both the accuracy of the tree layers and the fractional tree/shrub covers strongly depend on the accuracy of the DSM da ta. Thus, DSMs derived from newly developed, high-quality matching methods are indispensable. The usage of a dense and accur ate DSM and DTM are absolute prerequisites in order to be able to derive accurate topographic parameters which in turn are used to derive t he tree layers and the fr actional tree/shrub covers. The fact that these topographic parameters alone almost suffice for the genera tion of the tree layers and the tree/shrub covers underlines the importance of DSM and DT M quality. The existing Swiss national LiDAR data have low point density a nd due to partial canopy penetration or LiDAR flights with leaves off they ar e not appropriate for accurate sh rubs/tree detection and vegetation canopy modeling (BALTSAVIAS et al., 2006). The present s tudy showed that derivation of DSMs by high-quality matching, compared to LiDAR, has an additional advantage; images of 1997 and 2002 were used to derive multi-temporal DSMs, tree layers and tree/shrub covers, thus permitting a better analysis of ch anges of tree/shrub area. Use of mode rn digital photogrammetric sensors, would lead to avoidance of scanner and film problems, better radi ometric quality, and use of the NIR for classification, all factors that would result in a more accurate mapping and cha nge detection of trees and shrubs. Furt her future investigations will include the direct use of mul titemporal matching DSMs and LiDAR DT Ms for co-registration, therefore reducing bias errors, and estimation of tree layers and fractional covers using dire ctly these datasets and their differences, possibly in a combination with multi-spectral classification.

To summarize, high-resolution 3D information as obtained by me ans of DSMs is ind ispensable for modeling changes in forest a nd other wooded areas. Modeling retrospective changes of these areas is f easible, since old aeri al images are often available and necessary variables of the normalized DSM can be calculated.

### Acknowledgements

The study was carried out in the frame of the Swiss mire monitoring program initiated in 1996 at the Swiss Federal Research Institute WSL and funded by the Swiss Agency for the Environment, Forest and Landscape (BAFU) and WSL. We acknowl edge the support of Ruedi Boesch for providing the LiDAR data and Peter r Longatti for linguistic improvements (both WSL) and Devrim Akca (ETH Zurich) for the co-registration of the DSMs.

### References

- BALTSAVIAS, E., 1999: Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54(2-3): 164-198.
- BALTSAVIAS, E., GRUEN, A., KÜCHLER, M., THEE, P., WASER, L.T. & ZHANG, L., 2006: Tree height measurements and tree growth estimation in a mire environment using digital surface models. Proceedings of Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry, 14 – 15 February, Vienna, Austria, pp. 44-54.
- COPPIN, P., JONCKHEERE, K., NACKAERTS, B., & MUYS, B., 2004: Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. International Journal of Remote Sensing, 25(9): 1565-1596.
- GRUEN, A. & AKCA, D., 2005: Least squares 3D surface and curve matching. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 59(3): <u>151-174</u>.
- GRÜNIG, A., STEINER, G.M., GINZLER, C., GRAF, U. & KÜCHLER, M., 2004: Approaches to Swiss mire monitoring. International Peat Journal, 12: 55-73.
- GUISAN, A. & ZIMMERMANN, N.E., 2000: Predictive habitat distribution models in ecology. Ecological Modeling, 135(2-3): 147-186.
- HYYPPÄ, J., HYYPPÄ, H., INKINEN, M., ENGDAHL, M., LINKO, S. & YI-HONG, Z., 2000: Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes. Forest Ecology and Management, 128: 109-120.
- KIENAST, F., BRZEZIECKI, B. & WILDI, O., 1996: Long-term adaption potential of Central European mountain forests to climate change: A GIS-assisted sensitivity assessment. Forest Ecology and Management, 80: 33-153.
- KÜCHLER, M., ECKER, K., FELDMEYER-CHRISTE, E., GRAF, U., KÜCHLER, H. & WASER, L.T., 2004: Combining remotely sensed spectral data and digital surface models for fine-scale modelling of mire ecosystems. Community Ecology, 5(1): 55-68.
- KÜCHLER, M., ECKER, K., FELDMEYER-CHRISTE, E., GRAF, U. & WASER, L.T. Predictive Models of Mire Habitats: *bias* in detection of change. WetHydro XX, Warsaw Agricultural University Press., in press.
- LU, D., MAUSEL, P., BRONDIZIO, E. & MORAN, E., 2004: Change detection techniques. International Journal of Remote Sensing, 25(12): 2365-2407.
- MATHYS, L., GINZLER, C., ZIMMERMANN, N.E., BRASSEL, P. & WILDI, O., 2006: Assessment of continuous landscape variables for extracting discrete forest areas. Forest Ecology and Management, 229, 2006, pp. 111-119.
- MCCULLAGH, P. & NELDER, J.A., 1983: Generalized linear models. London: Chapman and Hall, 511 p.
- NAESSET, E. & GOBAKKEN, T., 2005: Estimating forest growth using canopy metrics derived from airborne laser scanner data. Remote Sensing of Environment, 96(3-4): 453-465.

- SCHARDT, M., ZIEGLER, M., WIMMER, A., WRACK, R. & HYYPPÄ, J., 2002: Assessment of forest parameters by means of laser scanning. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV, Part 3A, pp. 302-309.
- SCOTT, J.M., HEGLUND, P.J., SAMSON, F., HAUFLER, J., MORRISON, M. & WALL, B., 2002: Predicted species occurrences: issues of accuracy and scale. Covelo, California: Island Press, 868 p.
- ST-ONGE, A. & ACHAICHIA, N., 2001: Measuring forest canopy height using a combination of LIDAR and aerial photography data. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV, Part 3/W4, pp. 131-137.
- TONER, M. & KEDDY, P., 1997: River hydrology and riparian wetlands: a predictive model for ecological assembly. Ecological Applications, 7(1): pp. 236-246.
- WASER, L.T., KÜCHLER, M., ECKER, K., SCHWARZ, M., IVITS, E., STOFER, S. & SCHEIDEGGER, C., 2007: Prediction of lichen diversity in an Unesco biosphere reserve - correlation of high resolution remote sensing data with field samples. Special Issue of Journal of Environmental Modeling & Assessment, in press.
- WATT, P.J. & DONOGHUE, D.N.M., 2005: Measuring forest structure with terrestrial laser scanning. International Journal of Remote Sensing, 26(10): 1437-1446.
- ZHANG, L., 2005: Automatic digital surface model (DSM) generation from linear array images. Ph.D. Thesis, Report No. 88, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland. URL: http://e-collection.ethbib.ethz.ch/ecol-pool/diss/fulltext/eth16078.pdf. (accessed 28 March 2007).

# Direkte Georeferenzierung von Luftbildern – Theorie und praktische Erfahrungen

## KLAUS LEGAT<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Die Arbeit befasst sich mit dem Verfahren der direkten Georeferenzierung von Luftbildern. Aufbau, Kalibrierung und Datenverarbeitung von Bildmesssystemen zur direkten Georeferenzierung werden kurz beschrieben, wobei der Schwerpunkt auf die Verarbeitung der mittels GPS/INS gemessenen Orientierungselemente gelegt wird. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Überführung der äußeren Orientierungselemente in Landeskoordinaten, die vielfach auf einem lokalen geodätischen Datum und einer – meist konformen – Kartenabbildung beruhen. Mögliche Fehlerquellen bei der direkten Georeferenzierung werden untersucht. Dazu gehören z.B. die Systemkalibrierung, die Transformation der gemessenen Orientierungswinkel und die Berücksichtigung von Erdkrümmung und Längenverzerrung der Kartenabbildung für die Höhenbestimmung. Ein weiteres Problem kann bei der Einbeziehung von mittels GPS gemessenen Bodenpasspunkten auftreten.

Die möglichen Fehlerquellen werden anhand zweier realer Projekte zusätzlich verdeutlicht. Gleichzeitig wird gezeigt, wie hoch die Qualität der Ergebnisse – d.h. die Übereinstimmung zwischen der indirekten und direkten Georeferenzierung – sein kann, wenn die GPS/INS Daten korrekt verarbeitet werden. Abschließend werden mögliche Einschränkungen der direkten Georeferenzierung für schwierige topographische Gegebenheiten aufgezeigt und der Bedarf nach Bodenpasspunkten für verschiedene Anwendungsbereiche untersucht.

## 1 Einleitung

Bei der direkten Georeferenzierung werden die Orientierungselemente der Bilder nicht über Bodenpasspunkte sondern anhand von GPS/INS ermittelt. Damit wird die Szenengeometrie von den Bildern auf den Boden extrapoliert. Dies ist ein bedeutsamer Unterschied zur geometrischen Interpolation zwischen den Passpunkten, wie sie bei der indirekten Georeferenzierung erfolgt.

Neben den Bildsensoren umfasst ein Messsystem für die direkte Georeferenzierung einen (oder mehrere) GPS-Empfänger und -Antenne(n) sowie eine inertiale Messeinheit (Inertial Measurement Unit, IMU). Im Idealfall werden sämtliche Sensoren an einem gemeinsamen stabilen Rahmen befestigt, wodurch unerwünschte Veränderungen der relativen Positionen und Orientierungen der Komponenten ausgeschlossen werden. Zudem muss das gesamte System synchronisiert sein, wofür sich die GPS-Zeit anbietet.

In der Praxis verwenden viele Befliegungsunternehmen gyrostabilisierte Kameras mit einer nachträglich eingebauten IMU, wodurch die erforderliche Stabilität der Kamera/IMU-Anordnung erreicht wird. Allerdings befindet sich die GPS-Antenne meist an einer anderen Position des Flugzeugs. Wenn nun die Kamera zur Optimierung der Bildlage verdreht wird, ändert sich auch der Positionsunterschied (Lever Arm) zwischen der GPS-Antenne und der IMU. Derartige

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Vermessung AVT – ZT-GmbH, Eichenweg 42, A-6460 Imst (k.legat@avt.at)

Variationen des Antennenoffset führen zu einer qualitativen Verschlechterung der GPS/INS-Daten (da diese Veränderungen kaum beobachtbar sind), sofern sie nicht aufgezeichnet und in der Berechnung berücksichtigt werden. Folglich kann es mitunter unmöglich sein, die GPS/INS-Position korrekt auf den Bildsensor zu übertragen.

Die eigentliche Berechung der Navigationsdaten beginnt mit der kinematischen Basislinien-Auswertung relativ zu einer oder mehreren GPS-Referenzstationen. Anschließend werden die Positionen (und evtl. auch Geschwindigkeiten) von GPS mit den Messdaten der IMU anhand eines Kalman-Filters integriert. Der Positions- und Orientierungsunterschied zwischen der IMU und dem Bildsensor wird entweder im Rahmen der GPS/INS-Berechnung oder anschließend angebracht. Weiters müssen die Ergebnisse für die tatsächlichen Auslösezeitpunkte der Kamera interpoliert werden, wodurch die äußeren Orientierungen des Sensors im Bezugssystem von GPS (WGS-84) erhalten werden. In den meisten Fällen benötigt man die Orientierungsdaten jedoch im Landeskoordinatensystem, weshalb diese entsprechend transformiert werden müssen. Die wichtigsten Schritte dabei sind (für Details siehe LEGAT 2006):

- Im Fall der Positionen ist die Überführung in ein nationales geodätisches Datum, die Anwendung der nationalen Kartenabbildung sowie ggf. die Berücksichtigung der Geoidhöhen erforderlich. Zusätzlich müssen die "Bildhöhen" mit einer weiteren Korrektur versehen werden. Der Grund dafür ist die Erdkrümmung sowie die Tatsache, dass ein Rotationsellipsoid (als rechentechnische Approximation der Erdoberfläche) nicht längentreu in die Kartenebene abgebildet werden kann. Diese Einflüsse werden anhand einer geeigneten Korrektur berücksichtigt, wobei die durch GPS/INS bestimmten Höhen eigentlich verfälscht werden (was die tatsächliche Flughöhe werden der Messung betrifft). Es wird dadurch jedoch jene Übereinstimmung von Lage und Höhe erreicht, wie sie traditionell durch den Einsatz von Passpunkten erzielt wird. Die Höhenkorrektur steht in engem Zusammenhang mit der Erdkrümmungskorrektur der indirekten Georeferenzierung (WANG 1980). Letztere reicht jedoch aufgrund des Extrapolationscharakters der direkten Georeferenzierung nicht aus.
- Im Fall der Orientierungswinkel muss die Datumstransformation (Änderung der ellipsoidischen Koordinaten, der Ellipsoiddimensionen sowie der Raumlage der Tangentialebene an das Ellipsoid) ebenfalls berücksichtigt werden. Zusätzlich muss die bei vielen Kartenabbildungen auftretende Meridiankonvergenz angebracht werden. Der Einfluss der Meridiankonvergenz ist üblicherweise wesentlich größer als jener des Datumsübergangs.

Nach Durchführung dieser Transformationen können die äußeren Orientierungen zur Verarbeitung der Bilddaten (z.B. Auswertung, Orthophoto-Erstellung) herangezogen werden. In bestimmten Fällen wird es zudem notwendig sein, eine Aerotriangulation (AT) zur Kontrolle und/oder weiteren Verbesserung der Bildorientierungen heranzuziehen. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn sehr hohe Qualitätsansprüche an die Ergebnisse gestellt werden (SKALOUD 2006).

## 2 Problemstellung

Unglücklicherweise gibt es eine Vielzahl potentieller Fehlerquellen bei der direkten Georeferenzierung, die die Qualität der "gemessenen" Orientierungen beeinträchtigen kann. Einige dieser

Fehlerquellen sind wie folgt (die Nennung entspricht der chronologischen Reihenfolge der Schritte in der Prozessierung und stellt keine Gewichtung dar):

- Unzureichende Stabilität der Sensoranordnung (inkl. Offsetvariationen, die durch eine Kamerastabilisierung verursacht werden).
- Synchronisationsfehler oder nicht kompensierte Verzögerungseffekte, z.B. Zeitunterschiede zwischen dem Auslösekommando an die Kamera und dem tatsächlichen Auslösen der Aufnahme.
- Kalibrationsfehler der Positions- und Orientierungsunterschiede der Sensoren (letztere werden als Boresight Winkel bezeichnet) bzw. nicht korrektes Anbringen der Kalibrationsdaten.
- Fehlerhafte Einstellungen oder Annahmen im Zusammenhang mit der GPS/INS-Auswertung, z.B. hinsichtlich des Fehlerverhaltens der Sensoren der IMU.
- Verwendung falscher Parameter für das geodätische Datum des Projektgebiets.
- Verwendung falscher Formeln (oder unzureichender Approximationen) für die Kartenabbildung.
- Versäumnis der korrekten Anwendung der Geoidhöhen (falls nötig) und/oder der zusätzlichen Höhenkorrektur zur Kompensation der Effekte der Erdkrümmung sowie der Längenverzerrung der Kartenabbildung.

Neben diesen technischen Punkten besteht eine weitere sehr bedeutsame Fehlerquelle: Mangelnder Informationsaustausch zwischen verschiedenen Partnern, die an einem gemeinsamen Projekt beteiligt sind (besonders im Hinblick auf Metadaten), und/oder Missverständnisse bzgl. der Verarbeitungsschritte, die durch die Partner umgesetzt werden. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass das Auftreten eines oder mehrerer dieser Fehler fälschlicherweise zu einem Misstrauen hinsichtlich der Technologie führt. Diesem Problem ist mit Nachdruck entgegenzuwirken.

## 3 Ergebnisse zweier realer Projekte

### 3.1 Analogbefliegung Sihlwald (CH)

Das erste der beiden Projekte wurde vom GIS Sihlwald in Auftrag gegeben (siehe SCHMIDT 2007). Dabei wurde eine Analogbefliegung mit einer Z/I RMK Top 30/23 Kamera mit Infrarotfilm durch ein deutsches Flugunternehmen im April 2005 vorgenommen. Die Befliegung erfolgte in den beiden mittleren Bildmaßstäben 1:2500 bzw. 1:4000. Die Vermessung AVT sollte die AT durchführen und anschließend Orthophotos des Gebiets mit einer Bodenauflösung von 5 cm erstellen.

Aufgrund vorerst unbekannter Probleme konnten die GPS/INS-Daten der Befliegung nicht für die AT verwendet werden. Zur Erreichung der Projektziele mussten deshalb zusätzliche Passund Kontrollpunkte vermessen werden. Die AT erfolgte schließlich GPS-gestützt, wobei eine "GPS-Driftkorrektur" erforderlich war.

Zu einem späteren Zeitpunkt wurde der Autor dieses Beitrags mit der Untersuchung der aufgetreten Probleme betraut. Ein Vergleich der GPS/INS-Daten mit den Ergebnissen der AT ergab Positionsunterschiede bis zu 3 m und Winkelunterschiede bis zu 2°. Sämtliche Diskrepanzen zeigten eine deutliche Systematik in Abhängigkeit der Befliegungsrichtung. Nach detaillierten Untersuchungen konnten folgende Fehlerquellen identifiziert werden: Unkompensierte Gyrostabilisierung der Kamera (dieser Einfluss ist im Posprocessing nicht vollständig kompensierbar), mangelnde Kalibrierung des Messsystems (Boresight), unkorrekte Kartenabbildung, Nichtanbringen der Geoidhöhen und der Höhenkorrektur sowie eine falsche physikalische Einheit der Winkelangaben. Durch entsprechende Korrektur dieser Fehler konnte eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse gefunden werden (die residualen Differenzen liegen vor allem an der Kamerastabilisierung sowie am Rauschen der GPS/INS-Daten und der AT).

Als Zusammenfassung der Resultate dienen zwei graphische Darstellungen für den Bildmaßstab 1:2500. Diese vergleichen die äußere Orientierung so wie sie von der Befliegungsfirma erhalten wurden und nach der korrekten Prozessierung.



Abbildung 1 zeigt die Unterschiede in den Positionen und Abbildung 2 jene in den Orientierungswinkeln. Weitere Details zu diesem Projekt finden sich in LEGAT ET AL. (2007).



Abbildung 1: Unterschiede der Bildpositionen (GPS/INS minus AT) vor (links) und nach (rechts) der Korrektur. Die Mittelwerte der nach der Korrektur verbleibenden Differenzen sind kleiner als 10 cm, die Standardabweichungen sind besser als 15 cm. Die Hintergrundfärbung deutet die Flugstreifen an. Gewisse Resteffekte in Abhängigkeit der Flugstreifenrichtung sind zu erkennen.



Abbildung 2: Unterschiede der Bildorientierungswinkel (GPS/INS *minus* AT) vor (links) und nach (rechts) der Korrektur. Die Mittelwerte der nach der Korrektur verbleibenden Differenzen sind kleiner als 0.01°, die Standardabweichungen liegen um 0.025°.

### 3.2 Digitalbefliegung Pernersdorf / Pulkautal (NÖ)

Das zweite der beiden Projekte wurde vom Amt der Niederösterreichischen Landesregierung in Auftrag gegeben und dient als Pilotprojekt zum Einsatz der Vexcel UltraCam<sub>D</sub> für die flächendeckende Erzeugung von digitalen Geländemodellen und Orthophotos. Die Befliegung wurde im Oktober 2006 durch ein deutsches Flugunternehmen mit einer Ground Sampling Distance von 10 cm (entsprechend einem mittlern Bildmaßstab von ca. 1:11.000) und GPS/INS vorgenommen. Aufgrund des Pilotcharakters des Projekts wurden für das ca. 35 km<sup>2</sup> große Gebiet rund 50 Passpunktfelder mittels GPS und terrestrisch vermessen. Neben der Kontrolle der Ergebnisse sollte ein Teil der Passpunkte auch zur Durchführung einer Selbstkalibrierung der Kamera verwendet werden. Als Längsüberdeckung wurde durch die Befliegungsfirma 80% gewählt.

Ähnlich des ersten Projekts gab es zunächst einige Probleme bei der Durchführung der AT. Eines dieser Probleme lag an der Kombination der Passpunkte mit den Orientierungselementen aus GPS/INS sowie am Umstand, dass die Ergebnisse im System der österreichischen Landesvermessung bestimmt werden sollten. Im Gegensatz zur Schweiz gibt es derzeit in Österreich noch keine flächendeckende Transformation geodätischer Genauigkeit zwischen dem traditionellen österreichischen Datum (MGI) und WGS-84 auf Basis von finiten Elementen. Stattdessen werden bei der Vermessung der photogrammetrischen Passpunkte üblicherweise Festpunkte der Landesvermessung mit verwendet, über die in der Folge lokale Transformationsparameter ermittelt werden. Dieses Verfahren bringt das Problem uneinheitlicher WGS-84 Koordinaten für die traditionellen Festpunkte mit sich und genau dieses Problem trat im vorliegenden Projekt auf. Es wurde zwar ein- und derselbe Festpunkt als Ausgangspunkt für die GPS Messungen für den Flugpfad und für die Passpunktbestimmung verwendet, dieser wurde jedoch in den beiden Fällen aufgrund eines Irrtums nicht mit denselben WGS-84 Koordinaten versehen. Die Unterschiede lagen bei etwa 20 cm und führten zu einer gegenseitigen Verschiebung, Verkippung und Skalierung zwischen dem Flugpfad und dem Netz der Passpunkte. Diese Diskrepanzen wurden im Rahmen der AT erkannt und durch eine Neuprozessierung des Flugpfads gelöst.

Ein weiteres Problem resultierte aus der geometrischen Stabilität der Kamera sowie aus der verwendeten Software zur Durchführung der AT (Match-AT). Das automatisch durchgeführte Matching der Bilder ergab eine sehr gute Verknüpfung des Bildblocks. Gleichzeitig entstanden jedoch signifikante Spannungen (im Meterbereich) zwischen dem Bildblock einerseits und den Passpunkten und Orientierungselementen aus GPS/INS andererseits. Da zunächst mittels Match-AT keine sinnvolle Lösung möglich war, wurden von Dr. Richard Ladstädter (Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie der TU Graz) verschiedene Untersuchungen mittels der AT Software Bingo angestellt, wobei sich bereits nach relativ kurzer Zeit der Erfolg einstellte. Dazu mussten Fehler innerhalb der Kameradatei beseitigt sowie einige Passpunktmessungen eliminiert werden, bei denen Definitionsunsicherheiten bzw. Messfehler bestanden hatten. Zu Vergleichszwecken wurden zwei Varianten der AT berechnet, mit bzw. ohne Selbstkalibrierung der Kamera. Die Unterschiede dieser beiden Varianten lagen für die Bildpositionen im Bereich < 10 cm, die Winkelunterschiede waren vernachlässigbar. Mit Match-AT konnte dagegen keine vernünftige Lösung ohne Selbstkalibrierung erzielt werden. Erstaunlich dabei ist, dass die Ergebnisse von Bingo ohne Selbstkalibrierung jenen von Match-AT weitgehend entsprechen.

Zur Dokumentation der Güte der GPS/INS Daten dienen hier wiederum zwei graphische Darstellungen, die die Orientierungselemente aus GPS/INS mit den Ergebnissen der AT vergleichen. Während Abbildung 3 die Bildpositionen gegenüberstellt, zeigt Abbildung 4 die verbleibenden Unterschiede zwischen den Orientierungswinkeln. Bei letzteren zeigt sich eine systematische Restdifferenz in Kappa, zu der mehrere Einflüsse beitragen: die geringere Genauigkeit des Yaw-Winkels aus GPS/INS, die verbesserte Genauigkeit von Kappa aus der AT sowie die Gyrostabilisierung der Kamera. Dieses Differenzmuster kann nicht auf Fehler in der Boresight Bestimmung zurückgeführt werden. Die Hintergrundfärbung gibt wiederum den Flugstreifen an.



Abbildung 3: Differenz der Bildpositionen (GPS/INS minus Bingo)



Abbildung 4: Differenz der Orientierungswinkel (GPS/INS minus Bingo)

#### 4 Zusammenfassung

Wie anhand der beiden realen Projekte gezeigt werden konnte, passen die Orientierungselemente der direkten Georeferenzierung bei korrekter Prozessierung sehr gut zu den Resultaten der AT. Einschränkungen der direkten Georeferenzierung bestehen bei sehr großen Variationen der Geländehöhen innerhalb eines einzelnen Bildes, da die Höhenkorrektur zufolge Erdkrümmung und Längenverzerrung der Kartenabbildung auch von der mittleren Geländehöhe abhängig ist. Dieses Problem wurde in LEGAT (2006) näher untersucht. In der Praxis werden sich die resultierenden Probleme jedoch in Grenzen halten.

Die Ergebnisse zeigen auch, dass für Befliegungsprojekte nicht notwendigerweise Passpunkte gemessen werden müssen. Bei einem vollständigen Verzicht ist jedoch die korrekte Prozessierung der GPS/INS Daten ein Muss. Aus diesem Grund sollten zumindest bei kritischen Projekten (besonders hinsichtlich der Höhenmessung) Kontrollpunkte vorgesehen werden, um grobe Höhenfehler ausschließen zu können.

### 5 Literaturverzeichnis

- LEGAT, K., 2006: Approximate direct georeferencing in national coordinates. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 60: 239-255.
- LEGAT, K., OTEPKA G., 2007: Direkte Georeferenzierung: Korrekte Verarbeitung der GPS/INS-Orientierungselemente für Luftbilder. XIV. Internationale Geodätische Woche Obergurgl.
- LEGAT, K., SKALOUD, J., AND SCHMIDT, R., 2007: Reliability of direct georeferencing Phase 2 A case study on practical problems and solutions. EuroSDR Official Publication No 51: Checking and improving of digital terrain models / Reliability of direct georeferencing: 169-184.
- SCHMIDT, R., 2007: GIS Sihlwald: Erzeugung hochauflösender Geodaten für Forschung und Schutzgebietmanagement, XIV. Internationale Geodätische Woche Obergurgl.
- SKALOUD, J., 2006: Reliability of direct georeferencing Phase 1 An overview of the current approaches and possibilities. EuroSDR Official Publication No 51: Checking and improving of digital terrain models / Reliability of direct georeferencing: 143-168.
- WANG, S., 1980: Einfluss der geodätischen Abbildungsverzerrungen auf die photogrammetrische Punktbestimmung. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Series C, Nr. 263.

### Anmerkungen

Die GPS/INS Daten in diesem Dokument wurden unter Verwendung der Software CAMEO bearbeitet. Der Autor bedankt sich bei Mag. Ronald Schmidt (GIS Sihlwald) sowie bei Dipl.-Ing. Rainer Prager (Amt der NÖ Landesregierung) für die Bereitschaft zur Veröffentlichung der Projektergebnisse innerhalb dieser Publikation. Dank gebührt weiters Dr. Jan Skaloud (Laboratoire de Topométrie, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) sowie Dr. Michael Gruber (Vexcel Imaging / Microsoft Austria) für die sehr fruchtbare Zusammenarbeit innerhalb der beiden Projekte. Besonderer Dank gebührt Dr. Richard Ladstädter für seine Unterstützung beim Lösen der AT Probleme mittels Bingo für die Befliegung Pernersdorf / Pulkautal.

# Objektbasierte Bildinterpretation: kann der Mensch ersetzt werden? Überlegungen zur Automatisierung der visuellen Interpretation am Beispiel der Überwachung des Koka-Anbaus in Kolumbien

### BAUER, THOMAS<sup>1</sup> & SUCHENWIRTH, LEONHARD<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Der Beitrag beschäftigt sich mit dem Ziel, die visuelle Bildinterpretation durch eine objektbasierte, automatisierte Interpretation zu ersetzen, die die Einbringung von Expertenwissen erlaubt. Diskutiert werden die Fragen, wie ein Interpretationsschlüssel, der für die visuelle Interpretation erstellt wurde, in ein Regelwerk für eine automatisierte Auswertung umgesetzt werden kann und welche Vor- und Nachteile daraus entstehen. Das konkrete Anwendungsbeispiel behandelt die Abgrenzung von illegalen Drogenanbauflächen auf Satellitenbildern mit einer mittleren räumlichen Auflösung. Die Ergebnisse werden mit Referenzdaten verglichen, die auf einer visuellen Interpretation beruhen. Weiters wird die Anwendbarkeit der Methode in der Praxis diskutiert.

## 1 Einleitung

Die visuelle Interpretation von Fernerkundungsdaten wird vor allem in Bereichen eingesetzt, in denen Kontextinformationen eine große Rolle bei der Auswertung spielen. Das konkrete Fallbeispiel beschäftigt sich mit der Überwachung von illegalen Kokaanbauflächen in Kolumbien. Die Überwachung des Kokaanbaus wird jährlich auf Basis einer visuellen Interpretation von Satellitenbildern mittlerer räumlicher Auflösung (Landsat) durchgeführt (UNOCD, 2005). Um die gesamte Fläche des Landes überwachen zu können, greift man aus Kostengründen auf Satellitendaten dieser Qualität zurück. Die Erkennung von relativ kleinen Kokafeldern (Durchschnittsgröße:1.3 ha) auf Satellitenbildern mit dieser räumlichen Auflösung erschwert eine automatisierte pixelweise Klassifikation. Daher kommt derzeit ausschließlich eine visuelle Interpretation zur Anwendung.

Die visuelle Interpretation ist ein sehr zeitaufwendiger und damit kostenintensiver Prozess. Darüber hinaus besteht die Gefahr, dass subjektive Ergebnisse zustande kommen, die sehr stark von der Erfahrung des Interpreten abhängen. Durch eine Automatisierung soll die Interpretation effektiver werden und vor allem objektive und transparente Resultate liefern.

In dieser Untersuchung kommt ein objekt- und wissensbasierter Ansatz zum Einsatz. Bei einem objektbasierten Ansatz stehen im Gegensatz zu pixelbasierten Verfahren Bildobjekte im Zentrum der Analyse. Der Trend zu Verfahren dieser Art hat sich in den letzten Jahren vor allem für die Auswertung von sehr hochauflösenden Daten verstärkt. Eine wissensbasierte Klassifikation hat das Ziel, Expertenwissen verstärkt für den Aufbau eines Regelwerkes einzusetzen. Ein Überblick über die Entwicklungen auf dem Gebiet der wissensbasierten Klassifikation findet sich z.B. bei

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Universität für Bodenkultur, Wien, Institut für Vermessung, Fernerkundung und Landinformation, Peter-Jordan-Straße 82, A-1190 Wien, Email: t.bauer@boku.ac.at

RICHARDS & JIA (2006) oder MOTA et al. (2005). Durch die Einbindung von GIS-Funktionalität in die Auswertung kann die traditionelle pixelweise Bildanalyse überwunden werden (BLASCHKE et al. 2005). Durch den gewählten Ansatz wird es möglich, komplexe Interpretationsschlüssel, die für eine visuelle Interpretation entwickelt wurden, für eine automatisierte Auswertung zu adaptieren (BAUER & KAISER, 2006). Zur Anwendung kommt die kommerzielle Software Definiens Professional 5, die den oben beschriebenen Ansatz verwirklicht.

## 2 Visuelle Interpretation

Der Erfolg einer visuellen Interpretation hängt stark vom Wissen und der Erfahrung der Interpreten ab. Der größte Nachteil liegt darin, dass die Ergebnisse subjektiv sind und nicht nachvollzogen werden können. Die Entwicklung eines Interpretationsschlüssels bietet eine Hilfestellung, um solche Probleme zu minimieren und um das Wissen der Interpreten zu dokumentieren. Wie in der Standardliteratur zur Fernerkundung angeführt (z.B. LILLESAND et al., 2004), können Interpretationsschlüssel auf zwei Arten generiert werden:

- Auswahl- oder Beispielschlüssel
- · Eliminationsschlüssel.



Abbildung 1: Eliminationsschlüssel für visuelle Interpretation

Für die Automatisierung der Interpretation von Kokaflächen steht ein Interpretationsschlüssel auf der Basis eines Eliminationsschlüssels (Entscheidungsbaum) zur Verfügung (Abb. 1). Dieser wurde von Experten des Büros für Drogen- und Verbrechensbekämpfung der Vereinten Nationen (UNODC) in Kolumbien für das Untersuchungsgebiet entwickelt. Daraus geht hervor, dass für die Erkennung von Kokafeldern vor allem die Objekteigenschaften Farbe, Größe und Kontextinformationen als relevante Merkmale herangezogen werden. In einem Regelwerk sollen die jeweiligen Entscheidungsmöglichkeiten nachgebildet werden.

## 3 Segmentierung

Die Segmentierung stellt die Grundlage für einen objektbasierten Ansatz dar. Im Zuge einer Segmentierung werden zunächst homogene Bereiche im Bild abgegrenzt, die den realen Objekten in der Natur nahe kommen. Das Bild wird dabei in sinnvolle, nicht überlappende Bildsegmente aufgeteilt werden.

Im konkreten Beispiel soll die Größe und Form der Segmente jener von Kokafeldern entsprechen, wie sie von einem menschlichen Interpreten abgegrenzt werden. Eine ähnliche Abgrenzung ist insofern wichtig, da im oben angeführten Entscheidungsbaum Regeln enthalten sind, die auch bei der automatisierten Interpretation zur Anwendung kommen - eine Anforderung, die oft schwer zu realisieren ist.



Originalbild Kleiner Scale Parameter Großer Scale Parameter Spectral Difference S.

Abbildung 2: Segmentierung in unterschiedlichen Auflösungsstufen

Die *Multiresolution Segmentation*, die in der Software *Definiens Professional* implementiert ist, erlaubt eine Segmentierung in unterschiedlichen Auflösungsstufen. Die Extraktion der Objekte wird in Abhängigkeit von der Auflösung vorgenommen und durch den *Scale Parameter* definiert. Eine ausführliche Beschreibung der *Multiresolution Segmentation* findet sich bei BENZ et. al (2003) oder LEUKERT (2002).

Das Homogenitätskriterium besteht aus der Farbe und der Form der Objekte, wobei für die Abgrenzung der Schwerpunkt im Fallbeispiel auf dem Kriterium Farbe liegt, da auch die Farbe im Entscheidungsbaum für die visuelle Interpretation eine entscheidende Rolle einnimmt. Abbildung 2 zeigt die Anwendung verschiedener *Scale Parameter* bzw. die Verwendung einer *Spectral Difference Segmentation* mit der ähnliche Objekte anhand der spektralen Eigenschaften zusammengefasst werden können.

Die Probleme, die bei der Segmentierung auftrete n können, sind in Abbil dung 3 dargestellt. Die weißen Polygone stellen dabei die Segmente da r, während die gelben Polygone die Ergebnisse

der visuellen Interpretation repräsentieren. Die be iden Bilder repräsentieren Extremsituationen, zeigen jedoch deutlich die Problematik, dass eine "perfekte" Abgrenzung der Felder schwer möglich ist.



Abbildung 3: Segmente (weiße Polygone) im Vergleich zur visuellen Interpretation (gelb). Linkes Bild: kleiner Scale Parameter, rechtes Bild: großer Scale Parameter.

### 4 Aufbau eines Regelwerkes

Der Aufbau des Regelwerkes zur Klassifikation der Segmente beruht auf dem zuvor beschriebenen Interpretationsschlüssel. Dabei werden für jedes Segment (Feld) die Regeln abgearbeitet. Unterschieden werden kann zwischen Regeln, für die der Interpret die Parameter festlegen muss und Regeln, die Abfragen in Bezug auf andere Datensätze beinhalten.

Die erste Abfrage bezieht sich auf die Analyse der Farbe der Segmente. Charakteristisch für Kokafelder ist der hohe Anteil an offenem Ackerboden. Daher erscheinen Kokafelder vorwiegend in Blautönen bei einer Falschfa rbendarstellung (Kanalkombination 4-3-2). Im Interpretationsschlüssel wird zwischen helle n und dunklen blauen Flächen unterschieden. Andersfarbige Flächen werden ausgeschieden. Alle rdings fehlt im Interpretationsschlüssel eine konkrete (quantitative bzw. qualitative) Beschrei bung der Farbwerte. Diese Regel kann daher nicht automatisiert werden, sondern die Pa rameter müssen mit Hilfe von Expertenwissen definiert werden. Die vielfältigen Erscheinungs formen von Kokafeldern und damit die Vielfalt an Farbwerten stellen ein Hauptproblem dar. Du rch das Fehlen eines phänologischen Kalenders, können die Farbwerte von potentiellen Kokafeldern sehr stark variieren. Frisch gepflanzte Felder können direkt neben abgeernteten Feldern liegen. Di e Gefahr besteht darin, bei einer zu breiten Definition der Schwellenwerte zu viele potenzielle Kokaflächen zu erhalten.

Neben der Frage der Farbe müssen weiters noch Objekte vom Interpreten definiert werden. Die kompliziert, da sie im Interpretationsschlüssel zwischen einer feinen und einer groben Text Eigenschaften von Kokafeldern, wie Textur und dass in beiden Fällen keine charakteristischen erkennen sind. Der Interpretationsschlüssel is undetailliert. Daher werden die Merkmale "Textu

Weitere Abfragen betreffen die Größe der Felder . Hier wird zwischen kleinen (< 3 ha) und großen Feldern (> 3 ha) unterschieden. Die Größenabfrage ist ein vages Kriterium, da die Größe der Segmente nur bedingt mit der Größe der Felder übereinstimmt.

Der Vorteil bei *Definiens Professional* ist, dass die oben beschrie benen Regeln mit Hilfe von *Membership Functions* definiert und Grenzen somit fließend gestaltet werden können.

Neben den Eigenschaften der Felder werden im Entscheidungsbaum Abfragen in Bezug auf Zusatzdaten gestellt. Diese Abfragen betref fen zum Beispiel da s Vorhandensein von abgegrenzten Feldern aus dem Vorjahr, die Veränderung der Landbedeckung, oder eine etwaige Besprühung der Felder zu einem gewissen Zeitpunkt.

Der Entscheidungsbaum und somit das Regelwerk führen zu drei möglichen Klassen:

- Felder mit Kokaanbau,
- Eventuelle Kokafelder (Felder, die durch Überflüge mit Flugzeugen noch überprüft werden müssen),
- Felder, die frei von Koka sind.

## 5 Ergebnisse

Um die Ergebnisse des Klassifikationsprozesses ausreichend bewerten zu können, werden die bbildung 4). Rote Polygone repräsentieren Resultate mit Referenzdaten verglichen (A Kokafelder, orange Polygone Felder, die überprüft werden müssen, grüne Flächen sind frei von Koka. Die gelben Polygone stellen die Referenzdate n dar, die auf einer visuellen Interpretation von Landsat-Bildern beruhen. Ein erster Vergleich zeigt deutlich, dass es bei der automatisierten Interpretation zu einer Überbestimmung bei der Abgrenzung von Kokafeldern kommt. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass die Refe renzdaten korrigierte Daten darstellen. D.h., die Feldgrenzen wurden durch einen Überflug überp rüft. Während beim Entscheidungsbaum drei Klassen vorkommen, stehen also für die Gena uigkeitsanalyse nur zwei Klassen (Koka und Nicht-Koka) zur Verfügung. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse der automatisierten Auswertung ebenfalls für die Genauigkeitsanalys e in eine Kokaklasse zusammengefasst. Im Untersuchungsgebiet beträgt die Gena uigkeit für die Kokaflächen 67,13% (Produzentengenauigkeit). Die Gesamtgenauigkeit (2 Klassen) liegt bei 90%.

Bei der Bewertung der Fehlerabschätzung müssen allerdings mehrere Faktoren berücksichtigt werden, die sich negativ auf die Genauigkeit de r Klassifikationsergebnisse auswirken können. Die visuelle Interpretation greift nicht nur auf die Auswertung der Satellitenbilder zurück, sondern auch auf Beobachtungen während der Üb erflüge. Es werden bei der automatisierten Auswertung auch Flächen als Kokaanbauflächen oder eventuelle Kokaanbauflächen erfasst, die traditionell nie Kokaanbauflächen waren, so z.B. Weideflächen oder eine felsige Gebirgslandschaft. Das Problem in diesem Fall ist, dass di e Regel, die die spektralen Eigenschaften eines Kokafeldes charakterisiert, ungenügend definiert ist.



Abbildung 4: Analyse der Genauigkeit: Koka

Abbildung 5 zeigt zwei Ausschnitte der Klassifi kation: im linken Ausschnitt sind Felder zu sehen, die sehr gut durch das Regelwerk erfa sst werden. Im rechten Bild sieht man zwei Probleme: einerseits eine Über bestimmung an Flächen, andererse its Felder, die von den Regeln nicht erfasst werden, da bei spielsweise die Farbe des Feldes nicht jener des Interpretationsschlüssels entspricht. Da s Feld wurde auf Grund von nicht direkt nachvollziehbaren Entscheidungen visuell als Koka interpretiert. Ein zusätzliches Problem ist die Mischpixelproblematik, die auf Grund der klei nen Felder und der geringen Auflösung des Sensors voll zu t ragen kommt. Währe nd der Mensch mit einer "gedanklichen Subpixelgenauigkeit" interpretiert, ist dies dem Computer bei diesem Algorithmus nicht möglich.



Abbildung 5: Vergleich automatisierte Interpretation (rote Polygone) - visuelle Interpretation (gelbe Polygone

## 6 Schlussfolgerungen

Die Entwicklung und Umsetzung eines Interpreta tionsschlüssels ist eine komplexe Aufgabe. Während die technische Umsetzung in ein Regelw erk relativ unproblematisch ist, ist die Frage einer geeigneten Segmentierung schwierig. Die Objekte (Felder) können nicht mit der Genauigkeit abgegrenzt werden, wie dies von einem menschlichen Interpreten durchgeführt wird.

Während die computergestützte Inte rpretation nur auf den Aussagen des Interpretationsschlüssels aufbaut, können die menschlichen Interpreten auf ihre Erfahrung zurückgreifen, die sich aber schlecht quantitativ oder qualitativ nachahmen lässt.

Fazit: mit einer automatisierten Interpretation kann derzeit keine ausreichende Genauigkeit erzielt werden, die den Menschen ersetzen kann. Zu komplex sind das Wissen und die Erfahrung des menschlichen Interpreten. Diese können nur schwer in einem Interpretationsschlüssel und folglich in einem Regelwerk 1:1 abgebildet Interpretation liegt aber darin, dass auf die ese Weise eine Vorauswahl an potenziellen Kokaflächen vorgenommen werden kann und sich der menschliche Interpretation für den beschriebenen Einsatz ein unterstützendes Instrume nt sein, um den menschlichen Interpreten z u entlasten.

## 7 Literaturverzeichnis

- BAUER T. & G. KAISER, 2006: Knowledge Transfer Formalising an Interpretation Key. In: Lang, S., Blascke, T., Schöpfer, E. (Eds.), 1st International Conference on Object-based Image Analysis (OBIA 2006), July 4-5, 2006, Salzburg, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVI (4/C42).
- BENZ, U, et al., 2003: Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 58: 239-259.

- BLASCHKE T., LANG S. & MÖLLER M., 2005: Object-based analysis of remote sensing data for landscape monitoring: recent developments. In: Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiania, Brasil, pp. 2879-2885.
- LEUKERT, K., 2002: Untersuchungen zur Segmentierung von Satellitenbilddaten für die Extraktion von GIS-Objekten;

http://www.definiens.com/pdf/publications/Leukert\_DGPF2002.pdf

- LILLESAND, T.M., KIEFER, R.W.& CHIPMAN, J.W., 2004: Remote Sensing and Image Interpretation.. Wiley, New York.
- MOTA, G.L.A., K. PAKZAD, S. MULLER, M.S.P. MEIRELLES, R.Q. FEITOSA & H.L. D C. COTUINHO, 2005: A framework for automatic low-resolution satellite image interpretation based on spectral, contextual and multitemporal knowledge. In: Proceedings of the 20th ISPRS Congress, July 12-23, 2004, Istanbul, Turkey: 216-221.
- RICHARDS, J.A. & JIA X., 2006: Remote Sensing Digital Image Analysis An Introduction. Springer, Berlin.
- UNODC, 2005: Colombia Coca Cultivation Survey. United Nations Office on Drugs and Crime, Vienna.

### Danksagung

Diese Forschungsarbeit wurde durch eine finanzielle Unterstützung des österreichischen Außenministeriums an das Büro für Drogen- und Verbrechensbekämpfung der Vereinten Nationen ermöglicht.

# Vergleich von pixel- und segmentbasierter Klassifizierung am Beispiel des Kaiserstuhls

#### Uwe Weidner & Hans-Peter Bähr<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Pixel- und segmentbasierte Verfahren zur Klassifizierung sind schon häufig hinsichtlich ihrer Ergebnisse verglichen worden. Das Bild, das sich aus diesen Vergleichen ergibt ist nicht einheitlich, sondern eher von den Anwendungen und den zu Grunde liegenden Daten geprägt. Aus diesem Grund wurde ein Vergleich eines pixel- und eines segmentbasierten Verfahrens am Beispiel des Kaiserstuhls basierend auf LANDSAT-Daten durchgeführt. Das Gebiet rund um den Kaiserstuhl zeichnet sich durch seine – im Vergleich zur geometrischen Auflösung des Sensorsystems – kleinstrukturierten Anbauflächen aus, so dass hier der Segmentierung als Grundlage für die Klassifizierung eine große Bedeutung zu kommt und sich die Frage stellt, ob und inwieweit die durch die Segmentgeometrien gegebene zusätzlich Information die Klassifizierung verbessert.

### 1 Einleitung

Betrachtet man die Ergebnisse von aus der Literatur bekannten Vergleichen zwischen pixel- und segmentbasierten Klassifizierungsverfahren, so ergibt sich kein einheitliches Bild. Sie sind vielmehr abhängig von der jeweiligen Anwendung, insbesondere von der Anzahl der Klassen und von der jeweils genutzten Datengrundlage, hier insbesondere von ihrer geometrischen Auflösung. Ein Beispiel hierfür sind hochauflösende Satellitendaten für urbane Anwendungen. In diesem Fall können für eine Reihe von Objekten Regeln basierend auf den Segmentgeometrien und ihrer Relationen als zusätzliche Information neben der spektralen Information genutzt und hierdurch das Ergebnis der Klassifizierung im Vergleich zu einer pixelbasierten Klassifizierung verbessert werden. Des Weiteren besteht der Vorteil, dass die Segmente zusammenhängende Bereiche sind und typische Effekte wie der Salz&Pfeffer-Effekt von rein pixelbasierten Verfahren nicht auftreten. Bei abnehmender geometrischer Auflösung in Relation zur Größe von homogenen Bildbereichen und natürlichen Objekten verliert die geometrische Information über die Segmente an Bedeutung, da sie tendenziell nicht mehr so stark zur Differenzierung zwischen den Klassen beiträgt. Diese Beobachtung ist die Motivation für einen Vergleich von pixel- und segmentbasierter Klassifizierung am Beispiel des Kaiserstuhls unter Verwendung von Landsat-Daten. Im Vergleich zu der Sensorauflösung sind die Landnutzung und somit auch die Landbedeckung in diesem Gebiet kleinstrukturiert, so dass der Segmentierung eine besondere Bedeutung zukommt. Werden die Parametereinstellungen so gewählt, dass größere Segmente entstehen, tritt eine Generalisierung in Form eines Zusammenfassens von Bereichen auf, die hinsichtlich der Klassifizierung jedoch getrennt sein sollten. Ferner kommen die Vergleiche gerade bei Sensordaten mittlerer Auflösung als Datengrundlage zu unterschiedlichen Ergebnissen.

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse von einigen in der Literatur durchgeführten Vergleichen von pixel- und segmentbasierten Klassifizierungsverfahren diskutiert. In Abschnitt 3

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Universität Karlsruhe (TH), Englerstraße 7, 76128 Karlsruhe

werden die Grundlagen des Vergleiches – Daten und Vorgehensweise – und die erzielten Ergebnisse vorgestellt.

## 2 Untersuchungen zum Vergleich pixel- und segmentbasierter Klassifizierungsverfahren

Der erste Schritt bei segmentbasierten Klassifizierungsverfahren ist die Segmentierung. Ihr Ergebnis hat einen direkten Einfluss auf die nachfolgende Klassifizierung. Segmentierungsverfahren für Fernerkundungsdaten wurden in z.B. in NEUBERT & MEINEL (2003) und BÖHNER et al. (2006) hinsichtlich der Segmentierungsergebnisse vor allem visuell an Hand von Gebieten mit landwirtschaftlichen und Waldflächen verglichen. Die Ergebnisse einer quantitativen Bewertung auf Grundlage der auch in MEINEL & NEUBERT (2004) angegeben Kenngrößen sind z.T. nur schwer zu interpretieren. Für die spätere Klassifizierung ist jedoch eine Übersegmentierung einer Untersegmentierung vorzuziehen, auch wenn die Segmente im Vergleich zu einer Einteilung wie sie von einem Auswerter vorgenommen würde nicht sinnvoll erscheinen. Dies hat eher einen Einfluss auf die Nutzung der Segmentierung für die weitere Verarbeitung (vgl. LEMP & WEIDNER (2005)) und ist nur dann für die Klassifizierung von Bedeutung, wenn hierfür die Segmentie und –topologie verwendet wird.

Vergleiche der Klassifizierungsverfahren auf der Basis hochauflösender Fernerkundungsdaten (IKONOS, QuickBird, DAEDALUS, digitale Luftbilder) finden sich in MANAKOS et al. (2000), MEINEL et al. (2001), LINDE & KIRSTEIN (2004), KRELLENBERG (2005), MARANGOZ et al. (2006) und DIERMAYER et al. (2006). Als pixelbasierte Verfahren wurden der *Expert Classifier* (*ERDAS*), Maximum-Likelihood-Klassifizierung (*Geomatica*), aber auch unüberwachte Klassifizierung mit anschließender Zuordnung eingesetzt. Die beiden Verfahrensgruppen führten zu vergleichbaren Ergebnissen hinsichtlich der Klassifizierungsgenauigkeit mit dem Vorteil homogenerer Klassifizierungsergebnisse beim segmentbasierten Verfahren, auch wenn Segmentgrenzen nicht immer der Örtlichkeit entsprechen und dies naturgemäß zu Fehlklassifizierungen führt. Anzumerken ist jedoch, dass in vielen der angeführten Arbeiten eine geringe Klassenanzahl zu differenzieren war.

Satellitendaten mittlerer Auflösung (LANDSAT) waren die Datengrundlage für die Arbeiten von WEISSTEINER et al. (2003). Hier war keine vollständige Klassifizierung angestrebt, sondern es standen nur ausgesuchte Klassen landwirtschaftlicher Anbauflächen im Vordergrund. Eine Limitierung bildete die geometrische Sensorauflösung im Verhältnis zur Feldgröße. WHITESIDE & AHMAD (2005) nutzen für ihre Untersuchungen in einem nordaustralischen Gebiet ASTER-Daten zur Differenzierung von zehn Landbedeckungsklassen. Die segmentbasierte Klassifizierung führt zu einer besseren Gesamtgenauigkeit im Vergleich zu einer pixelbasierten Maximum-Likelihood-Klassifizierung, jedoch sind Unterschiede bezüglich der einzelnen Klassen festzustellen. Auch wenn für das Gebiet Auflösung und Flächengrößen im Allgemeinen gut zusammen gehen, besteht doch die Gefahr des Einschlusses kleinerer Flächen in die Segmente (vgl. KOCH et al. (2003)). Auch für die Auswertung von MERIS-Daten mit einer geometrischen Auflösung wurde von SANTOS et al. (2006) ein Verfahrensvergleich durchgeführt. In diesem Fall unterlag das segmentbasierte dem pixelbasierten Verfahren, da hier das segmentbasierte Verfahren die Vorzüge hinsichtlich der Nutzung der geometrischen Segment-

information nicht zum Zuge kommen und die Klassifizierung allein auf der spektralen Information basiert.

## 3 Vergleich am Beispiel des Kaiserstuhls

### 3.1 Datengrundlage, Vorgehensweise und Ergebnisse der Segmentierung

Die Datengrundlage bilden Ausschnitte von zwei LANDSAT-Szenen mit einer Gesamtfläche von ca. 200 km<sup>2</sup> aus dem Frühjahr und Sommer 2000. Für die Klassifizierungen wurden – bis auf den Thermalkanal aufgrund der geringeren geometrischen Auflösung – für die beiden Klassifizierungsansätze jeweils alle zur Verfügung stehenden Kanäle genutzt. In der ersten Szene sind einige Wolken- und Schattenbereiche, die ausmaskiert und nicht klassifiziert wurden.

Für die pixelbasierte Maximum-Likelihood-Klassifizierung wurde das Programmpaket Geomatica, für die segmentbasierte Klassifizierung das Programm Definiens Professional eingesetzt. Die Segmentierung soll an dieser Stelle nicht getrennt von der Klassifizierung bewertet wurden. Auf Grund der speziellen Struktur des Gebietes hat die Festlegung der Segmentierungsparameter eine besondere Bedeutung. Als Grundlage für die Klassifizierung wurden daher fünf verschiede Segmentierungen mit unterschiedlichen Maßstabsparametern (5, 10, 12 15 und 20) erstellt. Hierbei wurde mit dem kleinsten Parameter begonnen, so dass die Segmentierungen mit den anderen Maßstabsparameter durch Zusammenfassen der Segmente erfolgen. Dies bringt bei größeren Szenen einen Vorteil hinsichtlich der Rechenzeiten. Es ist aber zu beachten, dass sich die Segmentierungsergebnisse gleicher Segmentierungsparameter bei z.B. umgekehrter Reihenfolge unterscheiden können. Bei den Segmentierungen wurde vor allem Gewicht auf die spektrale Information und bei den geometrischen Kriterien auf die Glattheit gelegt, da die Form der Landbedeckungsbereiche sehr unterschiedlich ist. Sie reicht von gestreckten bis zu kompakten Objekten. Zudem ist der Formparameter für Segmente der Segmentierungen mit kleinem Maßstabsfaktor aufgrund der Tatsache, dass die Segmente nur aus wenigen Pixeln bestehen, nicht aussagekräftig. Für alle Segmentierungen wurden die gleichen Parameter gewählt. Bei großem Maßstabsfaktor erfolgt eine Generalisierung, so dass Bereiche unterschiedlicher Landbedeckungen mit ähnlicher spektraler Information zusammengefasst werden. Der Maßstabsfaktor 12 führte zu einem visuell guten Ergebnis. Für den Klassifizierungsvergleich wurden jedoch auch die anderen Segmentierungsergebnisse genutzt, um ggf. direkte Abhängigkeiten von Maßstabsfaktor feststellen zu können.

Die Klassifizierungen erfassen Hauptklassen wie Siedlung, Industrie, landwirtschaftlich genutzte Flächen (Wein/Obstanbau, Acker, Wiese) sowie Wald und Gewässer auf deren Grundlage dann der Vergleich erfolgt. Zu diesem Zweck wurden spektral unterschiedliche Unterklassen klassifiziert und die entsprechenden Flächen zu den Hauptklassen anschließend aggregiert. Bei der segmentbasierten Klassifizierung wurde eine hierarchische Vorgehensweise gewählt und die Zugehörigkeitsfunktionen selbst definiert. Auch hier hat die spektrale Information eine vorrangige Rolle. Nur für den Uferbereich, der bei der pixelbasierten Klassifizierung kaum von Siedlung oder Industrie zu unterscheiden ist, half die Segmentgeometrie bei der Klassifizierung. Bei spektral zum Teil ähnlichen Klassen wie Wein und Wiese ist die manuelle Festlegung schwierig, so dass hier mit Beispielsegmenten (Samples) gearbeitet wurde. Die automatisch bestimmten Zugehörigkeitsfunktionen wurden jedoch noch manuell angepasst. Die Trainings-

gebiete für die pixelbasierte Klassifizierung wie auch die für beide Klassifizierungen genutzten Kontrollgebiete wurden auf Grundlage von Karten und Ortskenntnis festgelegt. Es wurde hierbei darauf geachtet, dass Bereiche die zur Festlegung von Zugehörigkeitsfunktionen für die segmentbasierte Klassifizierung nicht in die Kontrollgebiete fallen, um – genauso wie für die pixelbasierte Klassifizierung – eine unabhängige Grundlage zur Analyse zu haben.

#### 3.2 Ergebnisse der Klassifizierungen

Abbildung 1 zeigt das Ergebnis der pixelbasierten und Abbildung 2 das der segmentbasierten Klassifizierung, letztere beispielhaft auf der Grundlage der Segmentierung mit Maßstabsparameter 12. Ein visueller Vergleich dieser beiden Ergebnisse zeigt den Vorteil eines homogeneren Ergebnisses bei der segmentbasierten im Gegensatz zum Auftreten des Salz&Pfeffer-Effekts bei der pixelbasierten Klassifizierung. Zieht man jedoch die Satellitendaten (Abbildung 3 mit eingeblendeten Kontrollgebieten) hinzu, muss man feststellen, das bereits bei diesem Maßstabsparameter kleinere Bereiche innerhalb umgebender größerer Landbedeckungsbereiche zu großen Segmenten zusammengefasst worden sind (vgl. KOCH et al. 2003). Beispiel hierfür ist der untere große Waldbereich in der Mitte des Ausschnittes. Die innerhalb von Definiens Professional zur Verfügung gestellte Stabilität der Klassifizierung (Visualisierung nach dem Ampelprinzip, Abbildung 4) aufgrund der Differenz der bestimmten Zugehörigkeitswerte liefert eine Grundlage zur Analyse der Unterscheidbarkeit der Klassen gemäß den definierten Regeln. Es zeigt sich, dass hier vor allem die Klassen Wein und Wiese betroffen sind, aber auch Acker. Dies sind die Klassen, bei denen sich die manuelle Festlegung der Zugehörigkeitsfunktionen als schwierig erwies und der Weg über automatisch generierte Zugehörigkeitsfunktionen auf der Grundlage von Beispielsegmenten gewählt wurde. Abbildung 5 stellt die Gesamtflächen der Klassen aus den verschiedenen Klassifizierungen gegenüber. Auffällig sind hierbei die Klassen Wein und Acker, bei denen die Flächen für Wein mit zunehmendem Maßstabsparameter zu- und die Flächen für Acker abnehmen. Die Gesamtfläche beider Klassen ist konstant und liegt in der Größenordnung der Gesamtflächen der pixelbasierten Klassifikation. Somit ist in diesem Falle eine direkte Abhängigkeit von der Segmentierung gegeben, die sich aber bei den anderen Klassen nicht zeigt.

Eine quantitative Bewertung auf der Grundlage der Konfusionsmatrizen der pixelbasierten (Tabelle 1) und der segmentbasierten Klassifizierung (Tabelle 2, wiederum beispielhaft basierend auf der Segmentierung mit Maßstabsfaktor 12) und der hieraus ableitbaren Kenngrößen wie Produzenten-, Hersteller- und Gesamtgenauigkeit sowie des  $\kappa$ -Index zeigt insgesamt keine signifikanten Unterschiede der Ergebnisse. Dies gilt zum einen zwischen pixelund segmentbasierter, aber auch für die segmentbasierten Klassifizierung untereinander (Tabelle 3), auch wenn für einzelne Klassen wie *Wiese* Unterschiede ggf. aufgrund der verwendeten Trainingsgebiete der pixelbasierte Klassifizierung auftreten. Weitere Einzelheiten zum Vergleich finden sich in WAKALUK 2007.



Sledlung Industrie Wein Acker Wiese Wald Gewässer Uferbereich Wolken/Schatten



Abbildung 1: Ergebnis der pixelbasierten Klassifizierung

Abbildung 2: Ergebnis der segmentbasierten Klassifizierung



Abbildung 3: Kontrollgebiete



Abbildung 4: Visualisierung Stabilität



Abbildung 5: Gesamtflächen der Klassen der unterschiedlichen Klassifizierungen

		Referenz								
		Siedlung Industrie Wein Acker Wiese Wald Gewässer							Summe [ha]	KG
	Siedlung [ha]	29,4	1,8	1,4	2,1	0,0	0,0	0,0	34,7	0,85
	% der Referenz	96,9	9,8	1,3	2,3	0,0	0,0	0,0		
	Industrie [ha]	0,1	15,9	0,0	0,5	0,3	0,0	0,8	17,6	0,90
	% der Referenz	0,2	85,6	0,0	0,5	0,8	0,0	4,1		
c	Wein [ha]	0,6	0,3	95,8	10,7	11,7	0,4	0,0	119,5	0,80
tio	% der Referenz	2,1	1,8	89,3	11,6	32,5	0,4	0,0		
ika	Acker [ha]	0,2	0,5	9,5	76,5	7,6	0,0	0,0	94,3	0,81
ssit	% der Referenz	0,7	2,7	8,9	83,0	21,1	0,0	0,0		
<u>a</u>	Wiese [ha]	0,0	0,0	0,5	2,4	16,5	1,0	0,0	20,4	0,81
-	% der Referenz	0,0	0,0	0,5	2,6	45,7	1,3	0,0		
	Wald [ha]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	81,3	0,0	81,3	1,00
	% der Referenz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	98,3	0,0		
	Gewässer [ha]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,7	18,7	1,00
	% der Referenz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	95,7		
	Summe [ha]	30,3	18,5	107,2	92,2	36,1	82,7	19,5	386,5	
	PG	0,97	0,86	0,89	0,83	0,46	0,98	0,96		

#### Tabelle 1: Konfusionsmatrix der pixelbasierten Klassifikation aus Abbildung 1

Tabelle 2: Konfusionsmatrix	der segmentbasierten	Klassifikation aus Abbildung 2

		Referenz								
	Siedlung Industrie Wein Acker Wiese Wald Gewässer								Summe [ha]	KG
	Siedlung [ha]	30,1	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	30,8	0,98
	% der Referenz	99,5	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
	Industrie [ha]	0,1	17,9	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	21,0	0,85
	% der Referenz	0,4	96,1	0,0	3,3	0,0	0,0	0,0		
	Wein [ha]	0,0	0,0	93,8	16,3	0,0	0,0	0,0	110,1	0,85
c	% der Referenz	0,0	0,0	87,5	17,7	0,0	0,0	0,0		
tio	Acker [ha]	0,0	0,0	12,9	65,7	6,8	6,6	0,1	92,1	0,71
ika	% der Referenz	0,0	0,0	12,0	71,3	18,8	8,0	0,7		
ssil	Wiese [ha]	0,0	0,0	0,1	7,2	29,3	0,0	0,0	36,6	0,80
, Sin (1) Sin	% der Referenz	0,0	0,0	0,1	7,8	81,2	0,0	0,0		
x	Wald [ha]	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	76,1	0,0	76,5	0,99
	% der Referenz	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	92,0	0,0		
	Gewässer [ha]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19,1	19,1	1,00
	% der Referenz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	98,2		
	Uferbereich [ha]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	
	% der Referenz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0		
	Summe [ha]	30,2	18,6	107,2	92,2	36,1	82,7	19,4	386,4	
	PG	1,00	0,96	0,88	0,71	0,81	0,92	0,98		

Tabelle 3: Qualitätskenngrößen im Vergleich

	pixelbasierte	segmentbasierte Klassifizierungen					
	Klassifizierung	MF 5	MF 10	MF 12	MF 15	MF 20	
Gesamtgenauigkeit	0,86	0,81	0,85	0,86	0,83	0,86	
κ-Index	0,83	0,77	0,81	0,82	0,79	0,83	

### Zusammenfassung

Die hier vorgestellten Untersuchungen zum Vergleich von pixel- und segmentbasierten Klassifizierungen anhand von Fernerkundungsdaten mittlerer Auflösung zeigen, dass die Verfahren der beiden Ansätze für diesen Anwendungsfall gleichberechtigt nebeneinander stehen. Hier zeigte sich, dass die Flächengrößen von Landbedeckungen in Relation zur geometrischen Auflösung der Daten entscheidend sind und die Segmentierung einen Einfluss auf das Ergebnis hat, auch wenn dies sich nicht in den Kenngrößen zur qualitativen Bewertung signifikant zeigt. Ein Problem sind kleinere Flächeneinheiten, die größeren Segmenten zugeschlagen werden. Hierfür wurde in KOCH et al. 2003 und SHATAEE et al. 2004 bereits auf eine Kombination von pixel- und segmentbasierter Klassifikation verwiesen, was einer Klassifizierung basierend auf einer hierarchischen Segmentierung auf nur einer Segmentierungsebene. Hinsichtlich einer Klassifizierung auf Basis einer hierarchischen Segmentierung sind weitere Untersuchungen nötig.

### 4 Literaturverzeichnis

- BÖHNER, J., SELIGE, T. & RINGELER, A., 2006: Image segmentation using representativeness analysis and region growing. In: Böhner, J., McCloy, K. & Strobl, J. (Hrsg.): SAGA -Analyses and Modelling Applications, Göttinger Geographische Abhandlungen, Vol. 115, S. 29 - 38.
- DIERMAYER, E., HOSTERT, P., SCHIEFER, S. & DAMM, A., 2006: Comparing pixel- and objectbased classification of imperviousness with HRSC-AX data. In: EARSeL Workshop of the SIG Urban Remote Sensing, Humboldt Universität zu Berlin, 2 - 3 March 2006.
- KOCH, B., JOCHUM, M., IVITS, E. & DEES, M., 2003: Pixelbasierte Klassifizierung im Vergleich und zur Ergänzung zum objektbasierten Verfahren. Photogrammetrie - Fernerkundung -Geoinformation (PFG) 3, S. 195 - 204.
- KRELLENBERG, K., 2005: Vergleich pixel- und objektorientierter Methoden zur Analyse städtischer Grünanlagen. In: 25. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF 2005, Rostock, S. 161 - 168.
- LEMP, D. & WEIDNER, U., 2005: Improvements of Roof Surface Classification Using Hyperspectral and Laser Scanning Data. In: Möller, M., Wentz, E. (Hrsg): IAPRSIS, Vol. 36-8/W27: ISPRS Joint Conferences 3rd International Symposium Remote Sensing and Data Fusion Over Urban Areas (URBAN 2005) / 5th International Symposium Remote Sensing of Urban Areas (URS 2005), CD-ROM.
- LINDE, L. & KIRSTEIN, W., 2004: Vergleich unterschiedlicher Klassifikationsansätze am Beispiel von hoch auflösenden Satellitenbilddaten im Raum Leipzig. Photogrammetrie -Fernerkundung - Geoinformation (PFG) 6, S. 519 - 526.
- MANAKOS, I., SCHNEIDER, T. & AMMER, U., 2000: A comparison between the ISODATA and the eCognition classification methods on basis of field data. In: IAPRS, Vol. 33, Part B4/2, S. 639 - 646.

- MARANGOZ, A., ORUC, M., KARAKIS, S. & SAHIN, H., 2006: Comparison of pixel-based and object-oriented classification using IKONOS imagery for automatic building extraction Safranbolu testfield. In: Turkish-German Joint Geodetic Days, CD-ROM.
- MEINEL, G., NEUBERT, M. & REDER, J., 2001: Pixelorientierte versus segmentorientierter Klassifikation von IKONOS-Satellitenbilddaten - ein Methodenvergleich. Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation (PFG) 3, S. 157 - 170.
- MEINEL, G. & NEUBERT, M., 2004: A comparison of segmentation programs for high resolution remote sensing data. In: IAPRSIS, Vol. 35, Part B (Comm. IV), CD-ROM.
- NEUBERT, M. & MEINEL, G., 2003: Evaluation of segmentation programs for high resolution remote sensing applications. In: ISPRS Workshop High Resolution Mapping From Space, Hannover, CD-ROM.
- SANTOS, T., TENEDORIO, J., ENCARNACAO, S. & ROCHA, J., 2006: Comparing pixel vs. object based classifiers for land cover mapping with Envisat-MERIS data. In: Proceedings 26nd EARSel Symposium on Remote Sensing, Warsaw, CD-ROM.
- SHATAEE, S., KELLENBERGER, T. & DARVISHSEFAT, A., 2004: Forest types classification using ETM+ data in the north of Iran - comparison of object-oriented with pixel-based classification techniques. In: IAPRSIS, Vol. 35, Part B (Comm. VII), CD-ROM.
- WAKALUK, S., 2007: Vergleich einer pixel- und segmentbasierten Klassifizierung auf der Basis von Landsat-Daten am Beispiel des Kaiserstuhls, Studienarbeit, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Universität Karlsruhe (TH).
- WEISSTEINER, C., BRAUN, M. & KÜHBAUCH, W., 2003: Synergetic use of remote sensing and soilborne data for regional yield predictions of malting barley (hordeum vulgare l.). EARSeL eProceedings 3(3), S. 347 - 353.
- WHITESIDE, T. & AHMAD, W., 2005: A comparison of object-oriented and pixel-based classification methods for mapping land cover in Northern Australia. In: Proceedings of SSC2005 Spatial Intelligence, Innovation and Praxis: The National biennal Conference of the Spatial Sciences Institute, September, 2005, Melbourne.

# Classification of Image Structure and Context for Mapping of Terrestrial Crude Oil Contaminations

#### S. HESE & C. SCHMULLIUS

Abstract: This work is part of the OSCaR pilot study (Oil Spill Contamination and mapping in Russia) and is co-financed by the International Office of the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) Germany as part of the Core-to-Core activities on "The Symptoms of Environmental Change in the Siberian Permafrost Region" with the Japan Society of the Promotion of Science (JSPS). This paper presents concepts for an object based mapping and classification system for terrestrial oil spill pollutions in West-Siberia using Quickbird data. An object oriented classification system is created to map contaminated soils and vegetation using spectral information, shape and context information. Due to the limited spectral resolution of Quickbird data context information is used as an additional feature. The distance to industrial land use and infrastructure objects is utilized to increase the classification accuracy. Validation of the results is done with field data from the Russian partners at the Yugra State University in Khanty-Mansiyskiy. Information about age and position of the polluted areas is used for this analysis.

### 1 Introduction

Terrestrial oil spill pollutions did not receive very much attention in the past. This is due to the regional and small scale character of terrestrial oil spill contaminations often also complicated by mixed spectral signatures of recovering vegeta tion, dead vegetation and contaminated soils. HÖRIG et al. (2001) analysed the spectr al properties of oil contaminated soils and sands using hyperspectral Hymap data and f ound specific absorption features in the SWIR region of the spectrum. SALEM & KAFATOS (2005) investigated the potential of spectral linear unmixing for delineating oil contamination types in AVIRIS hyperspectral data.

With increasing demand on the global markets for r crude oil it can be expected that the environmental impact for areas with intensive issue in the near future. Earth observation can change of the ecosystem in these regions.

The presented work of the OSCaR project (Oil Spill Contamination mapping in Russia) concentrates on spatial high resolution data to precisely date the oil spill events with multitem processing techniques.

The Khanty-Mansiyskiy area in West Siberia is one of the most important territories for the Russian oil and gas production with 58% of the total Russian oil production and being on the 3<sup>rd</sup> place with its national gas production (IWACO 2 001). Large areas are oil and waste water polluted from pipeline leakages with heavy di rect impact on underground and surface water quality, ecological conditions and quality of livin g (Fig. 1). The region is largely covered by taiga and tundra forest with sub arctic to contine ental climate and areas of permafrost with annual precipitation between 400 to 500 mm. The area ha s low nutrient peat based soils with long biological recovery times and includes import ant habitats for endangered fauna. Due to low evaporation and low temperatures, lack of drainage and small infiltra tions rates large wetlands
are formed. Thermokarst occurs due to melting ground ice (pattern ground) and thaw lakes and thermokarst pits can occur. The geological structur e of the West Siberian basin is dominated by lower cretaceous and jurassic sections. The oil and gas resources are found in stratigraphic and structural traps that extend into the Kara Sea region.



Figure 1: Oil spill polluted tundra area in the Samotlor oil field, West Siberia (S. Cejchan, BFH Hamburg).

The major environmental and social impacts come from activities like:

- 1. pipeline breaks, spills, and pipeline accidents (Fig. 1),
- 2. deposition of oily mud, drilling and production wastes,
- 3. chemical waste disposal and leaking storages,
- 4. emissions of hydrocarbons and greenhouse gases from flaring and venting of gases and oily waste burning and
- 5. inadequate emergency planning and under-de veloped awareness of environmental impact and remediation measures.

In the Khanty Mansiysk district more than 6 2000 oil wells have been drilled and according to sources from IWACO (2001) 64000 km of pipelines have been constructed.

The magnitude of the oils spills is very difficult to calculate. Accurate and updated data on recent numbers is very hard to obtain. According to di fferent sources about 2% of the total oil quantity produced is spilled into the tundra. The average oil spill loses about 2 tons of oil and covers about 1000 sqm.

# 2 The OSCaR pilot study (<u>Oil Spill Contamination Mapping in R</u>ussia)

The OSCaR (OilSpill Contamination mapping in Russia) pilot study project was initiated in 2005 as part of BMBF financed permafrost degradation proposal preparation meetings in Russia (Challenges of Permafrost Degradation of Siberian Soils to Science and Technology) and Core2Core activities with the Japanese JSPS programme in 2005.

The international office of the German Ministry for Education and Science co-financed OSCaR with funding for Earth observation data of the Khanty Mansiysk area (Landsat and Quickbird data). The main goal of OSCaR was to test very high resolution multispectral data for oil spill contamination mapping with advanced image processing algorithms. The methodological focus

is on spatial high resolution data analysis. Object oriented image analysis has been carried out to link the spectral characteristics of oil spill objects to secondary contextual image object feat ures that have a relation to oil spills (infrastru cture, drilling platforms, pipelines, waste water reservoirs or drilling mud reservoirs). Post classification analysis of sp ecific objects has to be performed to identify the structural identity of oil spills and the related objects.

In a second stage the development of the region is analysed using multi temporal data with lower spatial but with very high temporal resolution. Changes will be mapped starting in the early 80s and with 2-3 year steps until 2005. The main in terests are 1. to identify area and position of larger oil spills and 2. to map changes in industrial structures and infrastructure (increase of oil wells, construction of new pipelines etc.). Identification of oil spills in multitemporal data is important for dating of spill events and large oil pipeline leakages.

# 3 Data

For the OSCaR project very high resolution approximate 20x16 km subset of a region in the Siberia. A full "Basic Set" Quickbird data was s ordered from the archive from 2004 (acquisition date 2004-09-27) including the full resolu panchromatic data layer with 0.68 meter sp georeferenced using the RPCs provided by Digital Globe without applying ortho correction.



Figure 2: Analogue information (expert identification) about position and extend of oil pollutions compared with (above) Quickbird data.

The data was interpolated to the appropriate re solution with a bilinear interpolation to UTM 43 (WGS84) in 16 Bit radiometric resolution (nearest neighbour interpolation was not performed as no pixel based analysis was planned and smooth object geometry was a priority).

Landsat ETM+ and Landsat TM5 data was ordered for the path/row sets 156/17 and 157/17 with a temporal coverage for the years 1987, 1988, 1990, 1995, 2000, 2001 and 2003. Ground information was provided by the Russian partners from the Yugra State University in Khanty-Mansiyskiy as digital maps with indicated date s and extends of oil spill events and digitized

information about infrastructure and the pos ition of oil wells. Comparing the expert interpretation with Quickbird data a mismatch was evident (Fig. 2). The ground information was therefore used as an orientation and not digitized for training and validation.

It should be noted that precise ground data is ve ry difficult to obtain for intensively managed industrial areas in this region.

#### 4 Methods

The object-based strategy for data classif ication (BAATZ & SCHÄPE 1999 and BENZ et al. 2004) uses as a first stage a segmentation into differ ent scales of image object primitives according to spatial and spectral features. The segmentation is a bottom up region merging technique starting with one pixel sized objects. In numerous subs equent steps smaller objects are merged int o bigger objects minimizing the weighted heterogene ity of resulting objects using the size and a parameter of heterogeneity (local optimization procedure) (B ENZ et al. 2004). This concept has the advantage to account for contextual information using image objects instead of the pixel based concept used frequently as the basic element in Earth observation image analysis. In a second stage rule-based decisions can be used to classify the image objects. Class based feature definitions (integrating a post classification analys is) are possible as well as the inheritance of class descriptions to form a class hierarchy.

Object based image analysis has been used since 1999 for different approaches in Earth observation and in different remote sensing di oriented methods to urban applications (D AMM et al. 2005; G RENZDÖRFER 2005, A RGIALAS & DERZEKOS 2003), biotope type classification (L ESER 2002) and forest applications: M ITRI & GITAS (2002) developed an object oriented classification model for burned area mapping. FLANDERS et al. (2003) tested the object oriented ap proach for forest cut block delineation. HESE et al. (2005) used contextual information to classify forest cover change patterns and C HUBEY et al. (2006) analyzed object oriented procedures for for forest inventory parameters from Ikonos data. Advantages over pixel-based approaches have been published mainly using very high resolution airborne or orbital Earth observation data. The primary advantage of reducing the spectral variability in very high spatial resolution data sets (spatial resolution better 5 m) is however only one aspect of object oriented image analysis.

In this work object oriented image analysis has been carried out to link the spectral characteristics of oil spill objects to secondary image object features that have a contextual relation to oil spills (e.g. infrastructure objects, oil well objects, pipeline objects and waste water reservoir objects or drilling mud reservoir objects). This is done to overcome the limitations of the spectral resolution with Quickbird data. The cl assification of these secondary objects is done in different segmentation scales. Post classifi cation analysis of specific objects has to be performed to identify the structural identity of oil s pills and related objects. The dataset wa s segmented into two different layers (a third layer was used experimentally). A hierarchical class description was build that classified water bodies and vegetation cover types in the finest level and infrastructure, roads and industrial sites in the coarser segmentation level (Fig. 6). Road objects and industrial classes were differentiate d with object shape features and with spectral characteristics. Oil contaminated areas were mapped with a thresholding of NDVI calculations into three different vegetation sub classes ranging from healthy vegetation to heavily polluted vegetation. The correlation between NDVI and oil spills is based on the reduced amount of healthy vegetation on oil contaminated soils. This is clearly visible in the NIR with a reduced

amount of reflectance in polluted areas. Water bodies and non-vegetated areas have been masked out to avoid the overlap with non-vegetated area s through inverted expressions. To increase the accuracy of the classification class related feature sets were designed that introduce distance in relation to the class infrastructure and industrial areas as a characteristic object property of oi 1 spill objects. Oil polluted areas are only classified in a specific distance range of 0 to 500 meters to road network objects, oil production pl atforms objects or other industrial objects. A typical example of oil polluted vegetation in direct neighbourhood of oil wells is shown in Fig. 3.



Figure 3: Quickbird multispectral (2.5 m, RGB 4-3-2) and panchromatic (0.6 m) data subsets of an oil spilled area connected to a drilling platform area and infrastructure image objects (West Siberia, Khanty Mansiysk district).



Figure 4: The Process Tree information for the primary object definition, the resegmentation of objects (object fusion, creation of the secondary segmentation level) and for the classification using the class hierarchy (implemented in Definiens Developer Software ver 6).

## 5 Results and Discussion

For this study (using only a small subset of the (more than 10%) of the area was found to be subset about 1298 are occupied by industrial obj open water bodies (Fig. 5). The amount of wate probably affected by oil spill pollu tions. The detection of water oil spills has been neglected in

this work. The developed class hierarchy will be refined and applied to the complete dataset. The object definition and classification approach was saved in the Definiens Process format and imported to the Definiens Developer environment for this purpose.



Figure 5: Results of an object based classification of oil contaminated objects using object shape, spectral information and object context information (class related features). Data used: Quickbird multispectral data with 2.5 meter resolution. The distance to road objects and to industrial objects was used to increase the classification accuracy of oil spill contaminated objects. Water bodies were masked out in this analysis in an earlier step).

The classification results were not validated but a visual comparison with the multispectral data was done. Ground data is difficult to get for this kind of analysis but information from experts from the Yugra State University in Khanty-Mansiyskiy was used as reference information in this work. Some of the indicated contaminated areas showed significant differences in shape and position compared with Quickbird data. Automatic in tegration of the expert identification of oil contaminations into the classification / validation system was therefore not possible.

The features that were used in this work are not directly ba sed on the spectral properties of hydrocarbons. The classification us es indirect features that or iginate from the destructive pollution event (reduced reflectance in all visible e bands, reduced vitality of vegetation with reduced NDVI values) or features that include class-related context information and class related dependencies. Fresh oil contaminations with very low NDVI values on unvegetated soils were partly classified as water. The OSCaR project identified some methodological gaps that originate from this indirect mapping/image analysis approach . Results from this pilot project lead to an extended project proposal in 2006 that utilises hypers pectral orbital data sets together with very high resolution sub-meter data (the "OILSPILL" proposal). However - the performed analysis in OSCaR is one of the first approaches to set up an automatic oil sp ill contamination mapping system on the basis of very high resolution optic cal remote sensing data that could lead to an operational environmental monitoring system for large areas.

#### 6 Summary

This paper presents results of the BMBF (IB ) co-financed OSCaR (Oil Spill Contamination mapping in Russia) project for terrestrial oil sp ill classification in West Siberia with very high resolution Quickbird Earth observation data and object oriented image processing methods. The developed class and process hierarchy (developed in Definiens Professional and Developer) for a test area in the Khanty Mansiysk district in West Siberia classified oil spills using spectral information, object shape information and class related features. The classification procedure used indirect features to differentiate contam inated soils and contaminated vegetation objects from uncontaminated objects. As reference information analogue ground truth data from Russian experts was used. Final accuracy assessment ha s not been performed for this study but the preliminary results show that class related information can be applied successfully to utilise the structural image object information of oil spilled land surface objects.

Final conclusions however also identified the enced for mapping of specific spectral characteristics of hydrocarbon substances with very high spectral resolution data using calibrated and corrected hyperspectral information to complement the spatially very high resolution object oriented analysis with spectral signature and absorption feature analysis.

## 7 Acknowledgements

This work has been supported by the international office of the German Ministry for Education and Science. Ground truth information has been provided by the Yugra State University, Russia.

#### 8 References

- ARGIALAS, D. & DERZEKOS, P., 2003: Mapping urban green from IKONOS data by an objectoriented knowledge-base and fuzzy logic. In: Proc. SPIE Vol. 4886, p. 96-106, Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology II; Manfred Ehlers; Ed. 22-27 September, Aghia Pelagia, Crete
- BAATZ, M. & SCHÄPE, A., 1999: Object-oriented and multi-scale image analysis in semantic networks, in: proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Symposium: Operationalization of Remote Sensing, 16-20 August, ITC, NL.
- BENZ, U.C., HOFMANN, P., WILLHAUCK, G., LANGENFELDER, I. & HEYNEN, M., 2004: Multiresolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58 (2004), 239-258.
- CHUBEY, M., FRANKLIN, S. & WULDER, M., 2006: Object-based Analysis of Ikonos-2 Imagery for Extraction of Forest Inventory Parameters. *PE & RS*, April 2006.
- DAMM, A., HOSTERT, P. & SCHIEFER, S., 2005: Investigating Urban Railway Corridors with Geometric High Resolution Satellite Data, Urban Remote Sensing 2005, Berlin Adlershof.
- FISCELLA, B., GIANCASPRO, A., NIRCHIO, F., PAVESE, P. & TRIVERO, P., 2000: Oil Spill Detection using marine SAR images. *Int. J. Remote Sensing*, 2000, Vol. 21, No. 18, pp. 3561-3566.
- FLANDERS, D., HALL-BEYER, M. & PEREVERZOFF, J., 2003: Preliminary evaluation of eCognition object-based software for cut block delineation and feature extraction. In: *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 29, No. 4, pp. 441–452, August 2003.

- FOLKMAN, M., PEARLMAN, J., LIAO, L. & JARECKE, P., 2000: EO-1 Hyperion hyperspectral imager design, development, characterization, and calibration. SPIE, Vol. 4151, 2000.
- HESE, S. & SCHMULLIUS, C., 2005: Forest Cover Change in Siberia Results from the Siberia-II Project. International Conference on Remote Sensing of Environment, Conference Proceedings, St. Petersburg, Russia.
- HÖRIG, B., KÜHN, F., OSCHÜTZ, F. & LEHMANN, F., 2001: HyMap hyperspectral remote sensing to detect hydrocarbons. Int. J. Remote Sensing, 2001, Vol. 22, No. 8, pp. 1413-1422.
- IWACO Report, 2001: West Siberia Oil Industry Environmental and Social Profile. Final Report, edited by M. Lodewijkx, V. Ingram, R. Willemse, June 2001.
- JONES, B., 2001: A comparison of visual observations of surface oil with Synthetic Aperture Radar imagery of the Sea Empress oil spill. *Int. J. Remote Sensing*, 2001, Vol. 22, No. 9, pp. 1619-1638.
- LESER, C., 2002: Operationelle Biotoptypenkartierung mit HRSC-Daten Probleme und Lösungsansätze. In: Blaschke, T. (Hrsg.): GIS und Fernerkundung: Neue Sensoren – Innovative Methoden. Wichmann Verlag, Heidelberg: 88-97.
- LU, J. 2003: Marine oil spill detection, statistics and mapping with ERS SAR imagery in southeast Asia. *Int. J. Remote Sensing*, 2003, Vol. 24, No. 15, pp. 3013-3032.
- MITRI, G.H. & GITAS, I., 2002: The development of an object-oriented classification model for operational burned area mapping on the Mediterranean island of Thasos using LANDSAT TM images. in Viegas X. (ed.) Forest Fire Research & Wildland Fire Safety, 2002 Millpress, Rotterdam, ISBN 90-77017-72-0.
- PEDERSEN, J.P., SELJEV, L.G., SROM, G.D., FOLLUM, O.A., ANDERSEN, J.H., WAHL, T. & SKOLEV, A. 1995: Oil spill detection by use of ERS SAR data—from R&D towards preoperational early warning detection service. Proceedings of the 2nd ERS Applications Workshop, London, 6–8 December 1995, pp. 181–185.
- SALEM, F., KAFATOS, M., EL-GHAZAWI, T., GOMES, R. & YANG, R., 2005: Hyperspectral Image Assessment of oil-contaminated wetland. Intern. Journal of Remote Sensing, Vol. 26, No. 4, 20 February 2005, 811-821.

# Objektorientierte geomorphologische Klassifikation von IKONOS Daten im alpinen Raum

#### ANDREAS SCHWANDER & TOBIAS W. KELLENBERGER<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Objektorientierte Klassifikationsverfahren in Zusammenhang mit Satellitenbilddaten von einer Auflösung im Meterbereich eröffnen in der Fernerkundung neue Perspektiven. In diesem Artikel wird beschrieben, welche alpinen geomorphologischen Einzelformen aufgrund von IKONOS Satellitendaten und einem weitmaschigen digitalen Höhenmodell klassifizierbar sind. Aus dem digitalen Höhenmodell werden Hangneigung, Exposition und Kurvatur abgeleitet. Zusätzlich wird die Abflussakkumulation modelliert. Zusammen mit den Spektralinformationen finden diese Daten Eingang in die Klassifikation. Diese erfolgt objektorientiert mit dem Programm eCognition. Eine pixelbasierte Genauigkeitsanalyse der klassifizierbaren Einzelformen zeigt die Güte der Klassifikation. Zum Schluss wird ein Überblick über Verbesserungsmöglichkeiten gegeben.

# 1 Einleitung

Der zunehmende Siedlungsdruck in den Alpen weckt das Bedürfnis nach genauer Kenntnis der lokalen Gegebenheiten, insbesondere der Geomorphologie, um möglichen Naturgefahren frühzeitig zu begegnen. Bis anhin erfolgte eine geomorphologische Erhebung in situ mit Feldaufnahmen oder eine visuelle Interpretation von einzelnen, lokal verfügbaren Luftbildern wurde durchgeführt. Seit einigen Jahren sind nun räumlich hoch auflösende, digitale Daten von Erdbeobachtungssatelliten weltweit verfügbar. Abgesehen von einer visuellen Auswertung konnte ihr grosses Potential gerade im alpinen Raum nicht voll ausgeschöpft werden, da adäquate Klassifikationsverfahren fehlten. Die Entwicklung neuer segmentbasierter, objektorientierter Verfahren ermöglicht heute Klassifikationen, die bisher nur schlecht oder gar nicht durchgeführt werden konnten (DRÄGUT, L. & BLASCHKE, T., 2006, ZHANG et al., 2006,). Vor diesem Hintergrund wird die Anwendung des gebräuchlichsten segmentbasierten Klassifikationsansatzes eCognition (DEFINIENS, 2004) auf IKONOS Satellitendaten beschrieben. Dabei wurde untersucht, inwieweit sich dieser Ansatz für eine Klassifikation einzelner geomorphologischer Formen eignet. Nebst den Satellitendaten wurde für die Untersuchung das digitale Höhemodell DHM25 des Bundesamtes für Landestopographie (swisstopo) mit 25m Maschenweite verwendet (SWISSTOPO, 2005A). Als Untersuchungsgebiet wurde ein alpin geprägter Raum in der Zentralschweiz ausgewählt.

## 2 Untersuchte geomorphologische Formen

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die geomorphologischen Einzelformen, die aufgrund der IKONOS-Szene identifiziert werden konnten. Die Einzelformen sind nach Prozessbereichen

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Remote Sensing Laboratories, Geographisches Institut der Universität Zürich, Winterthurerstr. 190, 8057 Zürich: aschwand@geo.unizh.ch, Tobias.Kellenberger@geo.uzh.ch

geordnet. Da detaillierte geomorphologische Karten fehlen, ist nicht gesichert, dass alle möglichen Einzelformen im Untersuchungsgebiet berücksichtigt wurden.

Prozessbereich	geomorphologische Einzelform
glazialer Prozessbereich	Gletscher und Firne
	postglaziale Moränen
periglazialer Prozessbereich	Blockgletscher
gravitativer Prozessbereich	Schutthalden
fluvialer Prozessbereich	Schwemmebenen
	Erosionsrinnen
	Schwemmkegel
anthropogener Prozessbereich	anthropogene Flächen

Tab. 1: Zusammenstellung der geomorphologischen Einzelformen nach Prozessbereichen.

# 3 Klassifikationsmethode

Die geomorphologische Klassifikation erfolgte mit dem Bildanalyseprogramm eCognition (MEINEL, NEUBERT & REDER, 2001; DEFINIENS, 2004). Zu Beginn werden aus den Bilddaten einzelne möglichst homogene Segmente (Objekte) gebildet. Die Segmentierung kann in mehreren Massstabs-Ebenen durchgeführt werden, wobei multiskalige Segmentebenen erzeugt werden können, die in einer hierarchischen Beziehung zueinander stehen. Dieser Segmentierung wird durch wenige Parameter gesteuert, wobei sich die genaue Gestalt und Grösse der einzelnen Segmente daraus nicht im Vornherein erkennen lassen. Aus diesem Grund muss die Segmentierung in einem iterativen Prozess erfolgen, angepasst auf die zu erkennenden Objekte. Anschliessend werden die einzelnen Segmente klassifiziert. Dies geschieht entweder durch auf *fuzzy* Logik basierende Zugehörigkeitsfunktionen, die auf Expertenwissen beruhen oder durch den Einbezug von Trainingsgebieten. Grundlage für die weitere Klassifikation ist die Entwicklung einer Klassenhierarchie, die sämtliche Klassifikationsbedingungen enthält. Dabei können nebst den Grauwerten eines Segmentes auch seine Form-, Hierarchie-, Textur-, Struktur- und Geometrieeigenschaften berücksichtigt werden.

# 4 Datengrundlage und Datenvorverarbeitung

Für die Untersuchung wurde eine IKONOS Szene vom 01.08.2003 im GEO Format verwendet. Sie wurde vorgängig georektifiziert. Die Georektifizierung musste getrennt für den panchromatischen Kanal und die multispektralen Kanäle durchgeführt werden. Einerseits weisen diese Datensätze unterschiedliche Auflösungen (1m, respektive 4m) auf, andererseits sind die Szenen nicht genau deckungsgleich infolge des räumlichen Abstandes der panchromatischen und multispektralen Detektorzeilen auf der Fokalebene des Sensors. Eine gewisse Passungenauigkeit bleibt auch nach der Georektifizierung bestehen. Die Datenqualität ist einwandfrei. Es sind keine Störungen oder Ausfälle des Detektors zu sehen. An den Bergflanken haben sich teilweise

Quellwolken gebildet, die selbst und mit ihrem Schattenwurf kleinere Gebiete für die Untersuchung ungeeignet machen.

Das Untersuchungsgebiet mit Andermatt im Zentrum wird begrenzt von der Ortschaft Göschenen im Norden, der Passhöhe des Gotthardpasses im Süden, der Ortschaft Hospental im Westen und dem Oberalpsee im Osten. Die untersuchte Fläche beträgt rund 130 km<sup>2</sup> und weist eine Höhendifferenz von 1995m auf.

Das verwendete digitale Höhenmodell DHM25 wurde von den schweizerischen Landeskarten 1:25'000 abgeleitet. Die Höhengenauigkeit beträgt nach Schätzung des Bundesamtes für Landestopographie swisstopo 4-8m (SWISSTOPO, 2005A:13), die Horizontalgenauigkeit entspricht den topographischen Karten. Das digitale Höhenmodell wurde in einem GIS weiterverarbeitet, wobei zunächst Hangneigung, Exposition und Kurvatur abgeleitet wurden und anschliessend eine Modellierung der Abflussakkumulation vorgenommen wurde.

# 5 Klassifikation

#### 5.1 Segmentierung

Für die Segmentierung konnten nur die multispektralen Daten der IKONOS Szene verwendet werden, da der panchromatische Kanal wie in Kapitel 4 beschrieben nicht exakt deckungsgleich mit den multispektralen Kanälen ist. Die Daten des digitalen Höhenmodells konnten ebenfalls nicht zur Segmentierung verwendet werden, da die sich die Segmente ansonsten zu stark an dessen grobem Raster orientieren würden.

Die Segmentierung wurde in drei Massstabs-Ebenen durchgeführt, um den verschieden grossen geomorphologischen Einzelformen gerecht zu werden. Die Segmente der feinsten Ebene weisen eine mittlere Fläche von ungefähr 200  $m^2$  auf, während die Segmente der gröbsten Ebene eine durchschnittliche Ausdehnung von 1400  $m^2$  haben.

#### 5.2 Geomorphologische Einzelformen

#### Gletscher, Firne und postglaziale Moränen

Im Untersuchungsgebiet gibt es keine grösseren Gletschergebiete. Allerdings lassen sich mehrere Firngebiete ausmachen, die in den Bilddaten nicht ausgespart sind. Eine klare Abgrenzung gegenüber benachbarten mit Schnee bedeckten Flächen ist deshalb schwierig. Die starke spektrale Homogenität der Firne sollte bei der Segmentierung tendenziell zu grossen Segmenten führen. Diese Eigenschaften reichten aber nicht aus, um die Firne vom übrigen Schnee zu trennen, weshalb eine Klassifikation nicht gelang

Etwas unterhalb der Firne sind vereinzelt kleine postglaziale Moränen zu erkennen. Spektral sind sie kaum von anderen schuttbedeckten Hängen zu unterscheiden. Einzig im panchromatischen Kanal lassen sich die Oberkanten der Moränen ausmachen. Diese Eigenschaft konnte allerdings nicht für die Klassifikation verwendet werden. Das digitale Höhenmodell ist zudem zu weitmaschig, um die Moränen zu erfassen, weshalb diese nicht klassifiziert werden konnten.

#### Blockgletscher

Blockgletscher sind charakteristische Formen von Permafrostgebieten. Aufgrund des gefrorenen Untergrundes sind Blockgletscher nicht mit Vegetation bedeckt. Zudem weisen sie aufgrund ihrer kompressiven Fliessbewegungen Wülste auf. Diese drei Eigenschaften ermöglichten es einen Blockgletscher zu identifizieren.

In einem ersten Schritt wurde der Permafrost nach der Methode von HAEBERLI (1975) räumlich modelliert. Dazu werden die Höhenwerte, die Exposition und die Hangneigung aus dem digitalen Höhenmodell verwendet. Die Richtwerte des verwendeten Modells aus dem Jahr 1975 scheinen auf den ersten Blick veraltet zu sein, insbesondere der Klimawandel dürfte sich stark auswirken. Die enorm lange Reaktionszeit eines Blockgletschers lässt die Anwendung dieser Methode dennoch zu. Weiter wurde ein Vegetationsindex (NDVI, ROUSE et al., 1973) berechnet und berücksichtigt. Die charakteristischen Wulstformen konnten für die Klassifikation nicht umgesetzt werden.

Mithilfe dieser Eigenschaften konnte das Verbreitungsgebiet von Blockgletschern zwar eingegrenzt werden, eine direkte Klassifikation war nicht möglich.

#### Schutthalden

Schutthalden bilden sich unterhalb von Felswänden, aus denen sie durch die Verwitterung fortlaufend mit neuem Material versorgt werden. Dies hat zur Folge, dass einerseits die Vegetationsbedeckung sehr gering ist und andererseits ein typischer Schüttwinkel zwischen 27° und 38° entsteht (MEISSEL, G., 1998). Unter Einbezug des Vegetationsindex (NDVI) und einem empirisch etwas modifizierten Schüttwinkel können Schutthalden sehr gut klassifiziert werden. Abbildung 1 zeigt ein Klassifikationsbeispiel einer Schutthalde.

#### Schwemmebenen, Erosionsrinnen und Schwemmkegel

Das geringe Gefälle von Schwemmebenen führt häufig zu verzweigten Gerinnen. Für eine Klassifikation reicht das Gefälle meistens bereits aus. Zur Unterscheidung von Gewässern müssen jedoch auch die spektralen Werte, insbesondere das nahe Infrarot, miteinbezogen werden.

Erosionsrinnen sind Kerben in den Talflanken, die durch starke fluviale Erosion entstehen. Die Verfügbarkeit von Wasser und ein relativ grosses Gefälle sind charakteristisch. Bereits die Segmentierung bringt lineare Segmente hervor, die sich aufgrund ihres grossen Gefälles gut von Strassen und anderen linearen Objekten unterscheiden lassen. Als zusätzlich Hilfe kann die Modellierung der Abflussakkumulation verwendet werden.

Schwemmkegel sind wie Schwemmebenen durch Sedimentation geprägt und schliessen in der Regel direkt an eine Erosionsrinne an. Zudem liegt das Gefälle eines Schwemmkegels zwischen jenem von Erosionsrinnen und jenem von Schwemmkegeln. Die Klassifikation musste zwingend an die Existenz einer Erosionsrinne gebunden werden. Dies macht auch die Klassifikationsgenauigkeit abhängig von jener der Erosionsrinnen.

Ein klassifiziertes Beispiel eines Schwemmkegels samt Erosionsrinne ist in Abbildung 1 (oben) dargestellt.





Schutthalde

893m



© SpaceImaging

**IKONOS Szene** 

oben: Quicklook (Echtfarbendarstellung) links: Detailansichten (Echtfarbendarstellungen und Klassifikationen)







Erosionsrinne

793m

Schwemmkegel



Abbildung 1: Detailansicht der geomorphologischen Kartierung

#### Anthropogene Flächen

Anthropogene Flächen sind spektral sehr heterogen. Dies wirkt stark erschwerend auf eine Klassifikation. Oft weisen solche Gebiete ein eher kleines Gefälle auf und sind vegetationsfrei. Gerade Strassen fallen ähnlich wie Erosionsrinnen oft durch lineare Segmente auf. Häuser und ähnliche Infrastrukturelemente weisen ebenfalls eine auffällige Geometrie der Segmente auf. Eine Klassifikation ist durch die grossen Heterogenitäten sehr umständlich, aber dennoch gut möglich.

#### 5.3 Genauigkeitsanalyse

Für die Bodenreferenz wurden 500 Testpunkte nach dem Zufallsprinzip ausgewählt. Die Testpunkte sind unabhängig der Flächenanteile der einzelnen Klassen und über die gesamte IKONOS-Szene verteilt. Grundlage einer visuellen Interpretation der Testpunkte waren in erster Linie die Bilddaten der IKONOS Szene. In Zweifelsfällen wurden die digitalen Pixelkarten PK25 des Bundesamtes für Landestopographie (swisstopo) verwendet.

Die Klassifikation wurde pixelweise mit der Bodenreferenz verglichen. Die erreichten Genauigkeiten für die einzelnen Klassen sind in Tabelle 2 zusammengestellt, die Gesamtgenauigkeit der Klassifikation in Tabelle 3.

Klasse	,producer's accuracy'	,user's accuracy'	Kappa- koeffizient
Schatten	100%	85.7%	0.86
Schnee	100%	100%	1
stehende Gewässer	100%	100%	1
Fliessende Gewässer	100%	100%	1
Fels	94.7%	85.7%	0.85
Schutt	88.5%	92.0%	0.92
Erosionsrinnen	46.2%	66.7%	0.66
Schwemmkegel	85.7%	75.0%	0.75
Schwemmebenen	100%	87.5%	0.87
anthropogene Flächen	57.1%	100%	1
denudative Flächen	98.5%	96.6%	0.93
Wald	92.3%	100%	1
Wolken	90.9%	100%	1

Tab. 2: Erreichte Genauigkeit nach Klassen.

,overall accuracy'	95.8%
Kappakoeffizient	0.94

Tab. 3: Erreichte Gesamtgenauigkeit der Klassifikation.

# 6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Wichtige geomorphologische Einzelformen konnten identifiziert und klassifiziert werden. Dazu zählen Schutthalden und Erosionsrinnen, aber auch Schwemmkegel und Schwemmebenen. Allerdings konnten lange nicht alle Einzelformen beurteilt werden, da manche mittels den zur Verfügung stehenden Daten gar nicht erst detektiert werden konnten. Nachfolgend sind die Resultate der Untersuchung zur Erkennbarkeit noch einmal tabellarisch zusammengefasst (Tab. 3).

geomorphologische Einzelform	klassifizierbar	nicht klassifizierbar
Gletscher und Firne		Х
postglaziale Moränen		х
Blockgletscher		Х
Schutthalden	х	
Schwemmebenen	х	
Erosionsrinnen	х	
Schwemmkegel	(x)	
anthropogene Flächen	х	

Tab. 3: Klassifizierbarkeit geomorphologischer Einzelformen.

Die angewandte Methode der segmentbasierten Klassifikation hat sich bewährt. Auf diese Weise konnten zusätzliche Klassenmerkmale verwende t werden, ohne dass sich gegenüber einer herkömmlichen pixelorientierten Klassifikation irgendwelche Nachteile ergeben hätten.

Insgesamt hat sich gezeigt, dass Einzelformen, deren Klassifikation mehrheitlich auf dem digitalen Höhenmodell beruht schlechtere Klassifikationsgenauigkeiten aufweisen. Klassen die im Gegensatz dazu weitgehend aufgrund ihrer spektralen Eigenschaften klassifiziert wurden, besitzen eine höhere Klassifikationsgenauigkeit. Der Grund dafür dürfte die wesentlich schlechtere räumliche Auflösung des DHM25 gegenüber den Bilddaten von IKONOS sein.

Potential für eine verbesserte Klassifikation ist in zwei Bereichen auszumachen. Einerseits könnte eine Weiterentwicklung der objektorientierten Klassifikationsmethoden zu besseren Resultaten führen, andererseits würde auch eine verbesserte räumliche Auflösung der Ausgangsdaten, speziell des Höhenmodells, eine Klassifikation geomorphologischer Einzelformen stark erleichtern.

Definiens hat mit einer neuen Version von eCognition (neu: ,Definiens Professional') bereits Anstrengungen unternommen die Möglichkeiten einer objektorientierten Klassifikation weiter zu verbessern. Allerdings konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht geprüft werden inwieweit sich die neue Programmversion auf die Klassifikation auswirkt.

Die räumliche Auflösung der Ausgangsdaten muss differenziert betrachtet werden. Die panchromatischen Bilddaten scheinen nicht mehr sehr viel Verbesserungspotential zu bergen. Die Geometrie einzelner Objekte kann mit den panchromatischen Daten gut extrahiert werden. Die multispektralen Bilddaten bieten hingegen mehr Verbesserungspotential. Sowohl eine

Erweiterung des aufgenommenen Spektralbereiches, als auch eine verbesserte räumliche Auflösung wären einer geomorphologischen Klassifikation zuträglich.

Die grobe räumliche Auflösung des verwendeten Höhenmodells hat die Klassifikation massiv eingeschränkt. Die Erstellung von Oberflächenmodellen mit stark verbesserten räumlichen Auflösungen durch beispielsweise Airborne-Laser-Scanning ist allerdings möglich und brächte sicherlich entscheidend bessere Resultate. Ein digitales Oberflächenmodell (DOM) mit ca. 2m räumlicher Auflösung für alpine Gebiete ist mittlerweile landesweit verfügbar (SWISSTOPO, 2005B). Damit liessen sich geomorphologische Einzelformen wesentlich besser kartieren.

#### 7 Literaturverzeichnis

DEFINIENS, 2004: User Guide 4: eCognition Professional 4.0, Definiens AG, München.

- DRĂGUŢ, L. & BLASCHKE, T., 2006: Automated classification of landform elements using objectbased image analysis; Geomorphology 81, S.330–344
- HAEBERLI, W., 1995: Untersuchungen zur Verbreitung von Permafrost zwischen Flüelapass und Piz Grialetsch (GR). Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie ETH Zürich, 17.
- MEINEL, G., NEUBERT, M. & REDER, J., 2001: Pixelorientierte versus objektorientierter Klassifikation von IKONOS-Satellitenbilddaten – ein Methodenvergleich. PGF 3/2001, S.157-170.
- MEISSEL, G.,: Modellierung der Reichweite von Felsstürzen. Innsbrucker Geographische Studien, Nr. 28, Innsbruck.
- ROUSE, J.W., HAAS, R.H., SCHELL, J.A. & DEERING, D.W., 1973: Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: third ERTS Symposium, NASA SP-351, NASA, Washington, DC, Vol. 1, Nr., S. 309-317
- SWISSTOPO, 2005A: DHM25 Das digitale Höhenmodell der Schweiz, Produktinformation, Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Wabern.
- SWISSTOPO, 2005B: DOM Das hochpräzise und informationsreiche Oberflächenmodell, Produktinformation, Bundesamt für Landestopographie swisstopo, Wabern.
- ZHANG, Y. & MAXWELL, T., (2006): A fuzzy logic approach to supervised segmentation for object-oriented classification. In: Proceedings of ASPRS 2006 Annual Conference, Reno, Nevada; May 1-5, 2006.

# Digitale Wärmebedarfskarte aus Laserscanning

#### HAUKE NEIDHART<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Die Arbeiten in diesem Forschungsprojekt zielen darauf ab, ein automatisches Verfahren zu entwickeln, um auf einfache Weise den Wärmebedarf und dessen räumliche Verteilung zu bestimmen. Das Ergebnis soll schließlich eine Wärmebedarfskarte sein, welche für weiterführende Arbeiten verwendet werden kann. Allein auf Statistik beruhende Verfahren können keine Angabe über die räumliche Verteilung machen. Mit Hilfe des zu entwickelnden Verfahrens wird dies möglich sein. Mit dem Verfahren hat man eine Möglichkeit, den Wärmebedarf von noch nicht erfassten Gebieten darzustellen. Das Verfahren soll das Potential haben, große Gebiete flächendeckend zu erfassen. Dafür muss es möglich sein, die Ausgangsdaten großflächig und dabei kostengünstig beschaffen zu können. Eine gute Datenbasis stellt das luftgestützte Laserscanning dar. In den Laserscanning-Daten bildet sich die Erdoberfläche mit den sich auf ihr befindenden Objekten - unter anderem den Gebäuden - durch eine große Menge an Einzelpunkten ab. Durch geeignete Verfahren lassen sich aus den gemessenen Einzelpunkten die Gebäude erkennen und rekonstruieren. Durch das Gebäudevolumen hat man bereits eine wichtige Einflussgröße für den Wärmebedarf. Die andere wichtige Einflussgröße ist der spezifische Wärmebedarf. Der spezifische Wärmebedarf lässt sich aus einer Gebäudetypologie entnehmen. Dort ist der Wärmebedarf für Gebäudetypen wie Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser, Hochhäuser, etc. gegeben. Durch die Zusammenführung von Gebäudevolumen aus Laserscanning und spezifischen Wärmebedarfskoeffizienten aus einer Gebäudetypologie lässt sich so eine Wärmebedarfskarte ableiten. In diesem Beitrag werden die Verfahren zur Klassifikation der Punkte, der Segmentierung und der Rekonstruktion der Gebäude gezeigt. Anschließend wird anhand der geometrischen Größen der Gebäudetyp bestimmt und der Wärmebedarf berechnet.

## 1 Einleitung

Das Ziel der Arbeiten ist eine genaue Bestimmung des Wärmebedarfs und dessen räumlicher Verteilung. Dies kann dann für Modell-Rechnungen in Energiesystemmodelle einfließen. Eine digitale Wärmebedarfskarte stellt in einem Energiesystemmodell die Verbrauchsseite dar. Die Erzeuger-Seite sind die Kraftwerke. Mit den Energiesystemmodellen können verschiedene Varianten (Kraftwerke stilllegen/durch bessere ersetzen/neu bauen oder bessere Dämmung bei Gebäuden) durchrechnen und so eine optimale Versorgung mit Wärme zu bestimmen.

Die folgenden Kapitel befassen sich mit der Erzeugung der digitalen Wärmebedarfskarte. In Kapitel 2 wird der Verfahrensablauf von den Eingangsdaten zur Digitalen Wärmebedarfskarte grob dargestellt und erste Ergebnisse gezeigt. Kapitel 3 geht näher auf die Verarbeitung der Laserscanning-Daten und die Gebäuderekonstruktion ein. Das abschließende Kapitel gibt einen Ausblick auf die weiteren Arbeiten.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Dipl.-Ing. Hauke Neidhart, Institut f
ür Kartographie und Geoinformatik, Leibniz Universit
ät Hannover, Appelstra
ße 9a, 30167 Hannover, e-mail: hauke.neidhart@ikg.uni-hannover.de

# 2 Verfahrensablauf

Die Abbildung 1 zeigt den erarbeiteten Verfahrensablauf. Im ersten Projekt-Abschnitt (NEIDHART, 2004) wurden verschiedene Eingangsdaten für die Volumenbestimmung mit einbezogen. Im ersten Abschnitt wurde das Volumen durch die Kombination von Grundrissen der ALK und den Laserscanning-Daten bestimmt. Die mittlere Höhe aller Punkte innerhalb eines Grundrisses wurde als Dachhöhe angenommen. Die Höhe des Geländes ergab sich durch eine Analyse der Höhen in einem Puffer um den Grundriss. Mit diesen Werten konnten die Gebäude extrudiert werden und Volumen angegeben werden.

Um den Wärmebedarf zu bestimmen, muss das Gebäudevolumen mit einem spezifischen Wärmebedarf multipliziert werden. In bisherigen statistischen Ansätzen wurde dazu auf sogenannte Gebäudetypen (Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus, Hochhaus) zurückgegriffen. Um eine Verbindung zwischen den rein geometrischen Größen und der Gebäudetypologie herzustellen, wurden die Gebäudevolumen mit den statistischen Daten verknüpft und analysiert. Schließlich konnten die Gebäude anhand ihrer geometrischen Größen (Länge, Breite, Höhe, Fläche, Volumen) klassifiziert werden und somit der Wärmebedarf berechnet werden.



Abbildung 1: Verfahrensablauf

Die Abbildung 2 zeigt eine Gegenüberstellung des Wärmebedarfs aus dem Verfahren und den Werten, welche auf den Verbrauchsdaten beruhen. Die so erzielten Ergebnisse waren schon recht gut. Einige große Gebäudekomplexe (z.B. eine Schule am rechten Rand) konnten keinem Gebäudetyp zugeordnet werden und wurden bei der Hochrechnung nicht berücksichtigt, so dass dort der Wert zu niedrig ist. Am oberen Rand ist eine Mehrfamilienhaus-Siedlung zu sehen. Hier ist der hochgerechnete Wärmebedarf zu hoch. Dies lässt sich dadurch erklären, dass das Dachvolumen bei der Hochrechnung mit einbezogen wurde in Wirklichkeit aber unbewohnt und nicht beheizt wird. Dies lässt sich nur durch eine genauere Rekonstruktion der Gebäude verhindern.



Abbildung 2: Gegenüberstellung der Hochrechnung mit vorliegenden Verbrauchsdaten.

## 3 Gebäuderekonstruktion

Im aktuellen Projektabschnitt soll das Verfahren ohne ALK auskommen und im Wesentlichen Laserscanning als Datengrundlage verwenden.

#### 3.1 Klassifizierung von Laserscanning Punkten

Nicht immer hat man bei den 3D-Punkten Information darüber, ob es sich bei den einzelnen Punkten um Punkte auf Gebäuden, Bäumen oder dem Erdboden handelt. Teilweise bekommt man auch klassifizierte Punkte. Nicht immer ist diese Klassifikation jedoch brauchbar. Aus diesem Grunde wurde eine Routine für die Klassifikation (ABO AKEL et al., 2004) implementiert. Das implementierte Verfahren teilt die Punkte in schmale Streifen (ca. 3m) in x- und y-Richtung ein. Für die Punkte jedes Streifens wird ein Polynom für das Gelände bestimmt. Hierbei werden im ersten Schritt alle Punkte des Streifens gleich gewichtet und ein Polynom durch diese Punkte mittels Ausgleichung bestimmt. Anschließend werden die Punkte neu gewichtet. Punkte unterhalb des Polynoms behalten ein Gewicht von 1. Punkte oberhalb werden mit zunehmendem Abstand mit kleineren Gewichten versehen. Mit den neuen Gewichten wird ein neues Polynom bestimmt. Dies wird iterativ wiederholt, bis sich das Polynom nur noch geringfügig ändert.

Durch den Vergleich der Punkthöhen mit dem Polynom lassen sich die Punkte in Terrain und Off-Terrain unterscheiden. Jeder Punkt ist am Ende in x- und y-Richtung einmal klassifiziert worden. Interessant für die weitere Verarbeitung sind die Punkte, welche beide Male als Off-Terrain klassifiziert wurden.



Abbildung 3: Ergebnis der Klassifikation der Punkte in Terrain- und Off-Terrain-Punkte.

#### 3.2 Segmentierung

Nachdem die Punkte klassifiziert sind, werden zusammenhängende Punkte zu Segmenten zusammengefasst. Der topologische Zusammenhang bzw. die Nachbarschaft zwischen den Punkten kann durch eine Delaunay-Triangulation festgelegt werden.

Mittels eines Region-Growings werden die Punkte verschiedenen Segmenten zugeordnet. Aus der Liste der Dreiecke wird ein Dreieck genommen, welches noch keinem Segment zugeordnet ist und dessen drei Eckpunkte als Off-Terrain klassifiziert wurden. Von diesem Dreieck aus werden die drei benachbarten Dreiecke überprüft. Hat ein Nachbardreieck ebenfalls drei Off-Terrain Punkte als Eckpunkte, wird es zum Segment hinzugefügt. Von den neu hinzugefügten

Dreiecken werden dann ebenfalls die Nachbarn überprüft. Dies wird solange fortgeführt, bis kein passendes Dreieck mehr gefunden wird.

Am Ende der Segmentierung sind alle Dreiecke einem Segment zugeordnet. Alle Dreiecke eines Segments lassen sich anhand der Segmentnummer selektieren.

Über die Dreiecke kann man auf die zugehörigen Punkte zugreifen. Die Punkte eines Segments können so ebenfalls selektiert werden und für weitere Bearbeitungsschritte bereitgestellt werden.

Durch eine Verschmelzung der Dreiecke eines Segments erhält man einen Umring für ein Gebäude (Abb. 4). Allerdings ist dieser Umring sehr unregelmäßig, da er sich aus vielen Dreiecksseiten zusammensetzt.



Abbildung 4: Ermittelte (Gebäude-)Segmente. Zu kleine Segmente sind bereits entfernt worden.

#### 3.3 Bestimmung von Dachflächen

Im folgenden werden jeweils die Punkte eines einzelnen Segmentes betrachtet. Die Aufgabe besteht darin, in den Punktdaten Dachflächen zu rekonstruieren. Im Grunde sucht man Ebenen, zu denen viele der Punkte passen. Hierzu werden Ebenen festgelegt und alle passenden Punkte gesucht. Durch alle gefundenen Punkte kann man anschließend noch eine Ebene durch Ausgleichung bestimmen.

Bei der Festlegung der Ebenen hat man zwei Möglichkeiten. Ein Ansatz ist, jedes Dreieck der Triangulation als Ebene zu nehmen und für jedes die passenden Punkte zu suchen. Die Dreiecke sind im Vergleich zur Dachfläche sehr klein und die Normalenvektoren variieren recht stark. Die aufgestellten Ebenengleichungen entsprechen daher nicht der Dachfläche.

Eine andere Möglichkeit der Festlegung der Startebenen ist, zufällig drei Punkte auszuwählen. Liegen die Punkte gut verteilt auf dem Dach, erhält man eine gute Startebene. Der Nachteil

dieser Möglichkeit ist, dass man öfters drei Punkte auswählt, die gar nicht zu einer real existierenden Ebene gehören.

Ein wichtiges Kriterium dafür, ob ein Punkt zu einer gegebenen Ebene passt, ist der Abstand zur Startebene. Es hat sich jedoch gezeigt, dass der Abstand alleine nicht ausreicht. So kann es zum Beispiel sein, dass Punkte in der Nähe des Firstes in die Bestimmung der benachbarten Dachfläche mit einbezogen werden. Aus diesem Grund wurde zusätzlich für jeden Punkt ein lokaler Normalenvektor bestimmt. Als weiteres Kriterium fließt dann ein Vergleich des lokalen Normalenvektors zum Normalenvektor der Ebene mit ein.

Zur Bestimmung der Ebene wird zum Schluss für alle gefundenen Punkte eine Ebene ausgeglichen. Wenn man die ausgeglichene Ebene als neue Startebene nimmt und erneut die passenden Punkte sucht, lässt sich so das Ergebnis iterativ verbessern.



Abbildung 5: Punktwolke und daraus rekonstruierte Dachflächen.

## 4 Ausblick

Bei der Klassifizierung der Laserpunkte wird derzeit nur zwischen Terrain und Off-Terrain unterschieden. Die Off-Terrain-Punkte sollen in Zukunft noch in Gebäude und Vegetation unterteilt werden, z.B. durch Verwendung der first- und last-pulse Daten. Die Segmentierung soll dahingehend verbessert werden, dass eine Trennung von Gebäudeteilen möglich ist. Bei der Hochrechnung des Wärmebedarfs soll der spezifische Wärmebedarf aus der Gebäudetypologie aus der Berechnung herausfallen. Stattdessen soll nur die Geometrie des Gebäudes (Kompaktheit, Ausrichtung der Außenflächen) dazu benutzt werden.

# 5 Literaturverzeichnis

- ABO AKEL, N., ZILBERSTEIN, O. & DOYTSHER, Y., 2004: A robust method used with orthogonal polynomials and road network for automatic terrain surface extraction from lidar data in urban areas. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 35, ISPRS, 274-279.
- NEIDHART, H. & SESTER, M., 2004: Identifying Building Types and Building Clusters Using 3D-Laser Scanning and GIS-Data, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 35, ISPRS, 442-447.
- NEIDHART, H. & SESTER, M., 2006: Creating a digital thermal map using laser scanning and GIS, in: Proceedings of the District Heat and Cooling Symposium, Hannover, Germany.

# Landesweites Orthophoto dank der Digitalkamera ADS40

JEAN-LUC SIMMEN<sup>1</sup> & STÉPHANE BOVET<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Der Bedarf an hochwertigen Bildern stieg im Laufe der Zeit. Die swisstopo erfasst ihre Luftbilder mit Hilfe einer Digitalkamera, um die Erwartungen der Kunden und Geschäftspartnern sowie die eigenen Bedürfnisse zufrieden zu stellen. Dazu einige Beispiele der verfügbaren Bildqualität, welche von der Schweiz gegenwärtig erhältlich ist

#### Bedarf an Bilddaten

Der Bedarf an hochwertigen Bildern stieg im Laufe der Zeit. Noch vor 10 Jahren galt es als Hauptschwierigkeit die Bildbeschaffung für die Planungs- oder Analysearbeit zu bewältigen. Im letzten Jahrzehnt stieg die Nachfrage in gleicher Weise wie das Angebot, als Folge wurden neue standardisierte Bildprodukte auf den Markt gebracht. Parallel zur Lancierung dieser Produkte fand desgleichen eine Verbesserung in der Bildbearbeitung, welche vermehrt den Bedürfnissen angepasst wurde, statt.

Heute ist es leicht möglich, in kürzester Zeit ein Luft- oder Satellitenbild einer Region der Erde zu besorgen. Die Frage bezieht sich dann auf die Bildqualität, als auch auf den Inhalt und Aktualität des Bildes. Um die Entwicklung von Siedlungsgebieten einzuschätzen, ist ein vor 10 Jahren erfasstes Bild mit einer Auflösung von 50 cm mit Sicherheit nicht ausreichend. Während dieses Produkt sehr gut für die Illustrierung eines Berichtes über den regionalen Tourismus dienen kann. Hier eine Übersicht des neuen Orthophotos swissimage (Level 2) der Schweiz, das durch swisstopo hergestellt wurde.

## Stetig aktualisierte Bilder

1998 hat swisstopo (Bundesamt für Landestopografie) die Realisierung eines farbigen Orthophoto-Mosaiks mit der Auflösung 50 cm in Angriff genommen, welches die gesamte Schweiz abdeckt - dies war die Geburtsstunde von swissimage. Das Projekt wurde 2004 abgeschlossen. Sämtliche Aufnahmen wurden mit der Leica-Analogkamera RC30 erstellt. 2005 vollzog swissimage den Übergang vom Projekt- zum Produktstatus, nachdem der Entscheid zu Gunsten einer regelmässigen und systematischen Nachführung gefallen war.

Das orthorektifizierte Bildprodukt swissimage wird alle 6 Jahre regelmässig und systematisch in der ganzen Schweiz aktualisiert. Als Ergänzung zu den oben erwähnten Bildern, verlangt die Aktualisierung der nationalen Karte, auch qualitativ gute Bildinformationen. Somit wird ein zweiter Datensatz mit einer Verschiebung von 3 Jahren geflogen. Auf diese Art und Weise werden mindestens alle 3 Jahre neue Luftbilder von der ganzen Schweiz aufgenommen (Abbildung 1).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Jean-Luc Simmen (swisstopo, jean-luc.simmen@swisstopo.ch) und Stéphane Bovet (stephane.bovet@swisstopo.ch);



Abb.1: Koordinierte Befliegungen: swissimage SI und Generelle Nachführung der Landeskarte GN

Wenn die Aktualisierung der Bilder ein Hauptanliegen ist, dann ist die Qualitätsanpassung dieser Informationen an die Bedürfnisse der Benutzer und die des Marktes von ebenso grundlegender Bedeutung. Es gab Zeiten, wo das Schwarzweissbild zufriedenstellend war, heute hingegen kommt man nicht mehr ohne Farben aus. Ebenso wurde entschieden, die Bodenauflösung auf 25 cm zu verbessern, da man mit 50 cm räumlicher Auflösung an die Grenzen stiess (Abbildung 2).



Abb. 2: swissimage Herisau 25 cm

Der Bedarf nach einer besseren Bodenauflösung ist nur schwer realisierbar. Diese Problematik führt sichtlich zu einer signifikanten Reduktion der Oberfläche, welche jährlich aktualisiert wird, da die Flüge an die Geländeeigenschaften angepasst werden müssen. Es wurde ein Kompromiss gefunden, in dem die alpinen Regionen mit ihrer Initialauflösung (50 cm) weiterhin erfasst werden.

Um die Produktionskapazitäten der verfügbaren Humanressourcen zu erhöhen, schien es nützlich und ratsam den digitalen Schritt zu machen. Gleichzeitig zum Entscheid einer regelmässigen und systematischen Nachführung, beschaffte sich swisstopo eine digitale Luftbildkamera (Abbildung 3).



Abb. 3: ADS40 und das Super King Air

Die Wahl fiel auf das Modell Leica ADS40. In einer ersten Etappe ersetzt das neue Aufnahmegerät die Analogkamera für die Realisierung von swissimage. Mit Beginn des Projekts TLM (Topografisches Landschaftsmodell) ab 2008 (Objektauszug in 3D zur Nachführung der Schweizerkarte) werden diese Luftbildaufnahmen für die Kartennachführung ebenfalls mit der ADS40-Digitalkamera ausgeführt.

## Eine 16-bit Bildtiefe

Es sind nun einige Monate vergangen, seit dem die neue Kamera im Einsatz steht. Während diesem Zeitraum wurden die ersten operationellen Erfahrungen gemacht, die ersten Bilder wurden erzeugt und für Geschäftspartner und Kunden bereitgestellt.

Die ersten Ergebnisse haben im Unternehmen eine grosse Begeisterung hervorgerufen, da die Resultate bei der Klarheit und Lesbarkeit von Bildinformationen die Produkte vorhergehender Generationen übertrafen. Die Investition trägt also ihre Früchte im erwarteten Ausmass. Die Luftbilder in Form von Basisprodukten sind im Rahmen von Forschungsarbeiten erfolgreich benutzt worden. In Zusammenarbeit mit verschiedenen Institutionen sind diese Arbeiten geführt worden. Die Bilder sind lange eingescannte Bänder einer Region, deren Länge von der Linie abhängt, die die Flugzeuge geflogen haben (siehe Abbildung 4).



Abb. 4: Bildstreifen

Ein Objekt wird durch mehrere Bilder sukzessive aufgezeichnet, so dass eine 3D-Visualiseriung möglich ist (Abbildung 5).



Abb. 5: Sensorkonfiguration der ADS40 (modifiziert nach Leica Geosystems 2006

Die Basisbilder werden in 16-bit und nicht in 8-bit registriert, dabei wird die Informationsmenge für das menschlichen Auge im sichtbaren Spektrum überschritten, was neue Benutzungen des Bildes wie beispielsweise im Rahmen der automatischen Klassifizierung, der Forschung von Feuchtgebieten, usw. erlaubt.

CCD Zeilen (12'000 Pixel)	2 x Panchromatisch 465 – 680nm	
	blau 430 – 490nm	
	grün 535 – 585nm	
	rot 610 – 660nm	
	nir 833 – 887nm	
Pixelgrösse	6.5 x 6.5 μm	
Sichtfeld	64°	
Brennweite	62.77mm	
Stereo-Winkel	- 14.2°, 16° (14°, 16°, 18°), 28.4°	

Tab. 1: Sensorparameter der ADS40 (Quelle: Leica Geosystems 2006)

# Nahinfrarot-Bilder

Der Bau der Kamera erlaubt auch eine gleichzeitige Aufzeichnung des nahen Infrarots, das sich im für das menschliche Auge unsichtbaren Bereich befindet. Das nahe Infrarot ist sehr wertvoll, um die Entwicklung der grünen Oberfläche abzuschätzen. Denn die Aktivität des Chlorophylls ist in diesen Wellenlängen stark empfindlich. Die Anwendung dieses speziellen Werkzeugs zur Verarbeitung der Nahinfrarot-Bilder erlaubt über die Visualisierung hinaus einen besseren Gewinn zu ziehen. Ein Beispiel hierfür ist die Forstwirtschaft. Die Verfügbarkeit und die Anwendung der Nahinfrarot-Bilder befinden sich in einem grossen Umbruch. Während die Bilder in der Vergangenheit nur in einem begrenzten Rahmen aus Gründen der erzeugten Kosten vorhanden waren, werden die Bilder nun landesweit alle 3 Jahre aktualisiert (Abbildung 6).



Abb. 6: Infrarot-Bild von Frauenfeld

## Georeferenzierung und Bildverarbeitung

Der Flugverlauf erfolgt vollkommen unter der Kontrolle eines zentralen Systems. Die GPS-Daten (Global Positioning System) und die IMU-Daten (Inertial Measurement Unit) sind dabei unerlässlich, um die Rohdaten zu korrigieren und zu georeferenzieren. Dasselbe gilt für die GPS-Stationen am Boden, in unserem Fall dem AGNES-Netz. Alle diese erforderlichen Parameter können zur Annulation oder zur Wiederholung eines Fluges führen. Sie sind trotz allem nicht störend, verglichen mit den heiklen und bekannten meteorologischen Bedingungen in den Alpen, und abgesehen von einfachen Wolkenbildungen, die die Sichtbarkeit versperren. Bevor alle Daten in die Aerotriangulation einfliessen, sind noch einige Messungen von gut identifizierbaren Punkten vor Ort notwendig.

Die verwendete Aerotriangulation ist unter dem Gesichtspunkt von den Algorithmen deutlich verschieden, verglichen mit der bekannten Aerotriangulation für die klassischen Bilder. Die Zusammenstellung der Werkzeugpalette ist neu, man ist jedoch bemüht, eine klassische Umgebung zu erschaffen. Die Bearbeitung der Farben ist viel heikler. Sind die Bilder einmal auf das DTM-AV rektifiziert, müssen sie von 16-bit in 8-bit konvertiert werden. Dabei braucht es höchste Aufmerksamkeit, so dass die Informationen nicht verloren gehen und die Farbhomogenität beibehalten wird. Eine automatische Umsetzung ist nicht zufrieden stellend, daher werden die oben genannten Etappen von Spezialisten durchgeführt.

#### Archivierung und Datenerhaltung

Eine der Hauptschwierigkeiten, die mit dem 16-bit Bildformat auftreten, ist die Menge und die Vielfalt der verfügbaren Produkte. Die Kamera zeichnet 8 Kanäle in 16-bits auf, während nur 3 Kanäle unter ihnen für die Bearbeitung von swissimage notwendig sind.

Die einigen hundert Gigabytes, die während dem Flug aufgenommen werden, sind nichts im Vergleich zu den Terrabytes, die bei der Dekompression in ein nicht-proprietäres Format entsteht. Die Verfügbarkeit dieser wertvollen Bilder über die Zeit, welche von swisstopo garantiert wird, ruft eine erhebliche Investition bei der Archivierungsinfrastruktur hervor. Das gleiche gilt bei der Weiterentwicklung sowie für die Datenbanken. Um die Entwicklung und die Verfügbarkeit der verschiedenen Formate zu überwachen, muss auch hier in demselben Masse investiert werden.

#### Schlussfolgerung

Ein Generationenwechsel von einem Produkt ist für jedes Unternehmen eine Herausforderung. Das Zurechtkommen mit der Kamera ADS40 war - und ist - für swisstopo immer noch eine erhebliche Investition, aber auch eine grosse Quelle der Zufriedenheit. Aus der Sicht der Bilder und der erhaltenen Qualität hat sich die Wahl diesen zusätzlichen Schritt in die digitale Richtung als zweckmässig erwiesen. Die Schwierigkeiten waren wie oft, nicht jene, die man am meisten befürchtet hat, sondern jene, die man als zweitrangig eingestuft hat. Nach der ersten Anwendung der neuen Bilder für die Orthophotobearbeitung und für die Aktualisierung der Karten, ist es nun möglich, ihre Nutzung in die Richtung neuer Anwendungen, welche einen weiteren Reichtum eröffnet, zu entwickeln.

# Verbesserung der Hochwasservorhersage des Yangtze / Drei-Schluchten-Gebiet (China)

#### MICHAEL BAUMGARTNER<sup>1</sup>, MASSIMILIANO ZAPPA<sup>2</sup>, SONG ZHI HONG<sup>3</sup>, JOACHIM GURTZ<sup>4</sup>, BRUNO SCHÄDLER<sup>5</sup>

Zusammenfassung: Das im Jahre 2003 begonnene "Changjiang Flood Forecasting Assistance Project" hat zum Ziel, das für den mittleren Teil des Yangtze in China schon vorhandene Hochwasservorhersagemodell vor allem durch eine flächendifferenzierte Modellierung der Abflussbildung in Verbindung mit der Verwendung von numerischen Wettervorhersagen und der Bereitstellung von dafür nutzbaren Fernerkundungs- und weiterer Geoinformationen zu verbessern.

Das Projekt wird durch die Schweizer Katastrophenhilfe, einer Institution innerhalb der Direktion für Entwicklung und Zusammenarbeit (DEZA) in Kooperation mit der Changjiang Water Resources Commission (CWRC) ermöglich und wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Eidgenössischen Bundesamt für Umwelt (BAFU) und dem CWRC umgesetzt. Der realisierte Know-how- und Technologietransfer beinhaltete den Aufbau von der für die Hochwasserprognose benötigten Hard- und Softwareinfrastruktur wie Satellitenempfangsanlage, digitale Bildverarbeitung und geographische Informationssysteme (GIS), eines hydrologischen Modells aber auch die Ausbildung der CWRC-Mitarbeiter im Bereich der Fernerkundung und GIS sowie der hydrologischen Modellierung.

Ein operationelles, räumlich verteiltes Hochwasservorhersagemodell für die Einzugsgebiete oberhalb des 3-Schluchtendammes wurde weiterentwickelt und vor Ort installiert. Das Vorhersagesystem beinhaltet ausserdem die Integration von Fernerkundungs- und weiteren Geodatendaten, die Informationen über das Einzugsgebiet des 3-Schluchtendammes liefern. Das Daning Einzugsgebiet (ca. 20000km<sup>2</sup>) diente als Testgebiet in dem mit dem Modell experimentiert wurde. Nach der Kalibrierung des Modells im Daning Gebiet wurde das Modell dann sukzessive auf weitere Gebiet ausgedehnt, bis zur vollständigen Abdeckung des 3-Schluchtengebiets.

## 1 Einleitung

Der Yangtze (Changjiang) ist der grösste Fluss Chinas, aber auch einer der grössten der Welt; ausserdem ist er bekannt für das relativ häufige Auftreten katastrophaler Hochwasserereignisse jeweils im Zeitraum von April bis Oktober. Die Hochwasser haben ihre Hauptursache in räumlich und zeitlich ungleich verteilten Starkniederschlägen, die überlagert sind mit hohen Schmelzwasserabflüssen aus den im Oberlauf gelegenen Hochgebirgseinzugsgebieten.

Aufzeichnungen zeigen, dass seit dem Jahre 1153 an der Messstation Yichang (Einzugsgebiet > 1 Mio. km<sup>2</sup>) acht Mal ein Abfluss von mehr als 80,000 m<sup>3</sup>/sec. gemessen worden sind. Der grösste je gemessene Wert beläuft sich auf 105,000 m<sup>3</sup>/sec. im Jahre 1870.

Als Beispiel eines mittleren Hochwassers sei der Abfluss in Wuhan im August / September 2004 zu nennen: dieser stieg innerhalb einer Woche von ca. 11,000m<sup>3</sup>/sec. auf etwa 20,000m<sup>3</sup>/sec. und

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Michael Baumgartner, MFB-GeoConsulting, Eichholzstrasse 23, 3254 Messen, <u>baumgartner@mfb-geo.com</u> / www.mfb-geo.com

innerhalb von weiteren 4 Tagen auf 62,000m<sup>3</sup>/sec. an, was einer Pegelschwankung von ca. 24m entspricht (Abbildung 1). Man kann sich vorstellen, welche Hochwassermassnahmen allein in Wuhan – einer 8 Millionen-Stadt – ergriffen werden müssen, um die Bevölkerung einigermassen schützen zu können.

Auf Grund eines ähnlichen Ereignisses im Jahre 2002 hat die Schweiz (DEZA) Soforthilfe gesprochen, darunter auch eine Unterstützung der verbesserten Hochwasserprognose. In diesem Kontext begann im Jahre 2003 das "Changjiang Flood Forecasting Assistance Project" mit dem Ziel, das für den mittleren Teil des Yangtze in China schon vorhandene Hochwasser-Vorhersagemodell vor allem durch eine flächendifferenzierte Modellierung der Abflussbildung in Verbindung mit der Verwendung von numerischen Wettervorhersagen und der Bereitstellung von dafür nutzbaren Fernerkundungsdaten und Geoinformationen zu verbessern.



Abbildung 1 Display des Yangtze Pegelstandes am Eingang zum Verwaltungsgebäude des CWRC in Wuhan zwischen dem 10. August und dem 8. September 2004. Photo: Pierre Terrettaz.

Im Bureau of Hydrology am CWRC, welches für die operationellen Hochwasserprognosen zuständig ist existiert zwar eine gute Infrastruktur was die Messung hydrologischer und meteorologischer Daten angelangt. Bezüglich rechnergestützten Modellrechnungen, Satelliten-Fernerkundung und Analysen mittels geographischer Informationssysteme (GIS) bestehen aber keine Grundlagen. Das Projekt soll helfen, die Kapazitäten der Hochwasserprognose in dieser Richtung zu verbessern. Dazu wurden eine Satellitenempfangsanlage, eine server-basierte Rechenanlage für digitale Bildverarbeitung und GIS-Analysen sowie für hydrologische Modellrechnungen und Prognosen implementiert. Das Modell wurde im Daning Gebiet (2,000 km<sup>2</sup>) kalibriert und in einem weiteren Schritt auf das ganze 3-Schluchtengebiet ausgedehnt (~45,000 km<sup>2</sup>).

## 2 Erdbeobachtungs- und Geodaten

Bei der Hochwasservorhersage und -überwachung spielen Geodaten, insbesondere auch Erdbeobachtungsdaten, eine grundlegende Rolle. Fernerkundung mittels Satelliten ist eine hervorragende Technologie, um aktuelle Informationen über den Zustand der Erdoberfläche zu

sammeln. Diese Technologien waren am CWRC in Wuhan bis jetzt nicht vorhanden. In einer Evaluationsphase wurde gemeinsam mit den chinesischen Partnern die notwendige Infrastruktur für eine operationelle Hochwasservorhersage und -überwachung definiert.

Bei der Hochwasserprognose mit dem PREVAH-Modell (Precipitation-Runoff-EVApotranspiration-HRU related model) (GURTZ et al. 1999) können raster-basierte Geodaten direkt als Input verwendet werden. Die für das Modell minimal benötigte räumliche Auflösung beträgt 500m x 500m. Folgender Geodaten-Input ist für das Modell von Interesse: Geologie, Topographie (Höhe, Exposition, Hangneigung), Vegetation/Bodenbedeckung, Landnutzung, Bodenbeschaffenheit, Schnee/Eis. Für die Wetterprognose – ebenfalls ein wichtiger Input für die hydrologische Modellierung – spielen Wolkenoberflächentemperaturen eine grosse Rolle. Ein wesentlicher Teil dieser Daten kann mittels Satellitenfernerkundung erhoben werden.

Als weitere Anwendung können Satellitendaten auch zur Überwachung von überfluteten Gebieten eingesetzt werden. Werden diese Analysen über mehrere Jahre durchgeführt, können statistische Auswertungen durchgeführt werden und Gefahrenkarten hergeleitet werden.

#### 2.1 Datensätze

Die folgenden Datensätze wurden für das Projekt für wichtig befunden:

- NOAA-AVHRR-Daten, 1km x 1km Pixelgrösse
- Landnutzungskarten aus AVHRR-Daten hergeleitet; Drei-Schluchtengebiet; 1km x 1km Pixelgrösse
- Vegetationsindices hergeleitet aus AVHRR-Daten
- Wolkenoberflächentemperaturen hergeleitet aus AVHRR-Daten
- Digitales Höhenmodell mit einer Rastergrösse von 90m x 90m, hergeleitet aus Höhenlinien, die aus Russischen, topographischen Karten digitalisiert wurden
- Stereo-ASTER Daten für das gesamte Drei-Schluchtengebiet; 15m x 15m Pixelgrösse zur Ergänzung des digitalen Höhenmodells
- Landsat-TM Daten für das gesamte Drei-Schluchtengebiet; 30m x 30m Pixelgrösse
- QuickBird-Szene für die Umgebung des Drei-Schluchtendamms; 60cm x 60cm Pixelgrösse.

Um laufend Zugriff auf aktuelle Satellitendaten zu haben, wurde entschieden, eine NOAA-AVHRR Satellitenempfangsanlage anzuschaffen. Vorteile einer eigenen AVHRR-Anlage am CWRC sind:

- täglicher Zugriff auf die aktuellsten Satellitendaten
- Datenzugriff gratis
- Räumliche Auflösung für das hydrologische Modell genügend
- Grosses Field-of-View von AVHRR und damit Abdeckung grosser Gebiete möglich
- Herleitung der wichtigsten Inputvariablen für das Modell möglich

#### 2.2 Infrastruktur

Um eine operationelle Hochwasserprognose durchführen zu können, wurde eine server-basierte, über LAN und Internet vernetzte Infrastruktur zur digitalen Bildverarbeitung von Satellitendaten

und zur Analyse von GIS-Daten sowie zur hydrologischen Modellierung evaluiert und beschafft. Ausserdem wurde eine NOAA-AVHRR-Satellitenempfangsanlage der Firma VCS (Deutschland) erworben (Abbildung 2). Als Softwaretools wurden ERDAS Imagine (Leica Geosystems) und ArcGIS (ESRI) evaluiert und implementiert.



Abbildung 2: NOAA-AVHRR Satellitenempfangsanlage. Photo: M. Baumgartner.



Abbildung 3 Prozessierungskette für das Management der Fernerkundungs- und GIS-Daten bei der Hochwasservorhersage und -überwachung (© MFB-GeoConsulting).

Die Anlage wurde in der Schweiz aufgebaut, die Software (Operating system, Netzwerk, Bildverarbeitung, GIS, graphische Tools, hydrologisches Modell) installiert und einem Factory Acceptance Test unterzogen, wieder verpackt und nach China verschifft sowie am CWRC wieder aufgebaut und in Betrieb genommen (Abbildung 3). Nach der erfolgreichen Installation

vor Ort wurde ein Site Acceptance Test durchgeführt und schliesslich wurde die ganze Infrastruktur den Chinesischen Partnern vom CWRC übergeben.

## 3 Hochwasserprognosen

Das räumlich verteilte Model PREVAH wurde für die Vorhersage von Hochwassern ausgewählt. PREVAH wurde ursprünglich in der Absicht entwickelt, um das Verständnis der räumlichen und zeitlichen Variabilität von hydrologischen Prozessen in Einzugsgebieten mit komplexer Aggregation von gerasterten, räumlichen Informationen in so genannte "Hydrolgical Response Units" (HRUs). Sechs meteorologische (interpolierte) Variablen treiben das Modell an:

Niederschlag, Lufttemperatur, Globalstrahlung, relative Sonnenscheindauer, Windgeschwindigkeit und relative Feuchtigkeit.

Für die Anwendung des Modells im Drei-Schluchtengebiet wurde das Modell durch ein vollständiges System für Datenvorverarbeitung, Assimiliation, und Echtzeit-Hochwasservorhersagen erweitert (ZAPPA et al. 2005). Dies beinhaltete u.a. ein benutzerfreundliches Interface, eine Verbindung zu der Echtzeit-Datenbank für Niederschlag und Abfluss am CWRC sowie die Entwicklung von Tools für das Management von meteorologischen und hydrologischen Informationen.



Abbildung 4 Teilgebiet innerhalb des 3-Schluchtengebiets; für die eingefärbten Gebiete ist das Modell bereit für die operationelle Prognose. (© M. Zappa)

Für das Management von räumlichen Rasterdaten (Geodaten) wurde ein Stand-alone Tool für die Entwicklung, Parametrisierung und Initialisierung des GIS-basierten, räumlich verteilten

hydrologischen Modells entwickelt. Das Tool erlaubt die Assimilierung von Erdbeobachtungsdaten und weiteren Geo-Informationen, die mit den Tools ERDAS Imagine (Bildverarbeitung) und ArcGIS generiert wurden. Des Weiteren wurde ein Interface zwischen den hydrometeorologischen Daten und dem Tool zur räumlichen Interpolation im PREVAH-Modell entwickelt, das die Assimilierung, das Management und die Verifikation von hydrometeorologischen Daten ermöglicht. Der Kern des Modells assimiliert die räumlichen und hydrometeorologischen Informationen und berechnet den kompletten hydrologischen Zyklus eines Einzugsgebiets.

Der Vorhersagemodus des Modells wurde mit einer direkten Verbindung zur Datenbank der Niederschlags- und Abflussstationen des CWRC versehen. Über 70 Stationen liefern Daten um 02:00h, 08:00h, 14:00h und 20:00h für 34 Teilgebiete zwischen Chongqing und Yichang (Abbildung 4). Für diese Gebiete – mit einer Fläche von ca. 56,000km<sup>2</sup> – können somit bis zu vier Prognosen täglich gerechnet werden (Abbildung 5). Lokale meteorologische Wettervorhersagen können von der entsprechenden Abteilung am CWRC bezogen und interaktiv in das Modell geladen werden. Mittels der in Wuhan empfangenen AVHRR-Daten können zur Verbesserung der Wetter- und Niederschlagsprognosen aus den Thermaldaten nun auch Wolkenoberflächentemperturen bestimmt werden (Abbildung 6). Des Weiteren können quantitative Niederschlagsprognosen mittels eines numerischen Wettervorhersagemodels (MM5) gerechnet werden.

# 4 Ausbildung

Ein fundamentaler Aspekt eines solchen Projekts ist die Ausbildung von lokalen Spezialisten des CWRCs. In einer ersten Phase wurde eine Kurzausbildung in Wuhan unterstützt und anschliessend ein Selektionsverfahren durchgeführt, um vier Fernerkundungs- und GIS-Spezialisten für die weitere Ausbildung zu finden. In einem nächsten Schritt wurden die ausgewählten Personen während eines halben Jahres am ITC (International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands) im Bereich der Anwendung von Fernerkundungs- und GIS-Technologien in der Hydrologie weitergebildet. Nach dem erfolgreichen Abschluss dieser Ausbildung erfolgte eine projektspezifische Ausbildung in der Schweiz. Das von Schweizer Spezialisten durchgeführte Training wurde anschliessend in weiteren Kursen vor Ort am CWRC in Wuhan vertieft. Gemeinsam wurden Manuals erarbeitet, die den gesamten, operationellen Workflow genau definieren.

Parallel dazu wurde eine Gruppe von Hydrologen in Hydrologie, in der Echtzeit-Hochwasservorhersage und der Anwendung des PREVAH-Modells an der ETH Zürich und am CWRC ausgebildet.



DGPF Tagungsband 16 / 2007 - Dreiländertagung SGPBF, DGPF und OVG

Abbildung 5 Operationelle Hochwasservorhersage mit PREVAH, gekoppelt mit MM5 für ein ausgewähltes Testgebiet. (© M. Zappa)



Abbildung 6 NOAA-AVHRR vom 1. Nov. 2006, Taifun Cimaron, Echtfarbenkomposit (links) und Wolkenoberflächentemperaturbild (kalibrierte Temperaturwerte)(rechts, Temperaturskala (unten) (© MFB-GeoConsulting)
## 5 Ausblick

Mit der Ausbildung in Fernerkundung, GIS, hydrologischer Vorhersage und numerischer Wettervorhersage im Rahmen dieses Projektes erfolgte ein nicht unbeträchtlicher Wissenstransfer zugunsten der CWRC. Durch die damit verbundenen Investitionen (Hardware und Software) konnte die CWRC im Rahmen einer mittelfristigen Unterstützung einen modernen Stand der Hochwasserprävention und der daraus abgeleiteten Speicherbewirtschaftung für den Drei-Schluchten-Stausee erreichen.

Nach der Implementierung des Vorhersagesystems für das Testgebiet Daning und für weitere ausgewählte Gebiete erfolgte die Anpassung und Anwendung des Modellsystems für die weiteren Teileinzugsgebiete des Drei-Schluchten-Stausees durch die chinesischen Partner selbst. Für diese wie auch für die unterhalb des Stausees gelegenen Gebiete ist zur Optimierung des Hochwassermanagements eine Überarbeitung der Strategien für die Steuerung der Wasserabgabe am Damm vorgeschen. Mit dem Prognosesystem wird die Erarbeitung der notwendigen Präventions- und Bewirtschaftungsmassnahmen ermöglicht.

## 6 Literaturverzeichnis

- GURTZ, J., ZAPPA, M., JASPER, K., LANG, H., VERBUNT, M., BADOUX, A. & T. VITVAR, 2003: A comparative study in modeling runoff and its components in two mountainous catchments. Hydrological Processes, 17: 297-311.
- SONDEREGGER, C., 2004: Rainfall/Runoff Modeling of a Sub-Catchment of the Yangtze in China. Diploma Thesis at the ETH and University Zürich.
- ZAPPA, M., SONG ZHI HONG, BAUMGARTNER, M.F., GURTZ, J. & B. SCHAEDLER, 2005: The Changjiang Flood Forecasting Assistance Project. International Conference on Headwater Control VI: Hydrology, Ecology and Water Resources in Headwaters. Bergen, Norway, 20 - 23 June 2005.

## Möglichkeiten und Grenzen der Fernerkundung für das Monitoring und Safeguarding informeller Siedlungen: Eine Synthese

## Thomas Blaschke<sup>1,2</sup>, Peter Hofmann<sup>3</sup>, Isabel Georg<sup>4</sup>, Elisabeth Schöpfer<sup>1</sup>, Dirk Tiede<sup>1</sup>, Stefan Lang<sup>1</sup>, Matthias Möller<sup>5</sup>, Eduardo Araújo<sup>6</sup> & Hermann Kux<sup>6</sup>

Zusammenfassung: In den schnell wachsenden Städten Afrikas und Lateinamerikas nehmen informelle Siedlungen aufgrund verstärkter Migration in die Städte und fehlenden Steuerungsmechanismen zu. Den Siedlungen fehlt oft eine rechtliche Grundlage, die Wohnverhältnisse sind aufgrund begrenzter technischer und sozialer Infrastruktur, ungesunden Wohn- und Lebensverhältnissen oft katastrophal. Mehrere Fallbeispiele diskutieren die technischen Möglichkeiten und Grenzen der Fernerkundung und führen zu der Forderung ein Monitoringsystem für das Entstehen, das Wachstum und die Veränderungen aufzubauen, um Risikoanalysen und Bevölkerungsabschätzungen zu ermöglichen. Fernerkundung spielt dabei zweifellos eine unverzichtbare Rolle. In dieser Zusammenschau wird jedoch deutlich, dass Fernerkundung nur begrenzt und meist nur zusammen mit anderen Daten zur Analyse informeller Siedlungen geeignet jet. Während z.B. Townships in Südafrika als gut für das Fernerkundungsmonitoring geeignet gewertet werden, sind Favelas in Rio de Janeiro extrem schwierig abzugrenzen und zu kategorisieren. Diese und weitere Beispiele aus Afrika und Südamerika zeigen, dass die eigentlichen Probleme der Abgrenzung und der Klassifikation ontologisch und epistemologisch bedingt sind und weniger technischer Natur.

## 1. Problemstellung

In den schnell wachsenden Städten Afrikas und Lateinamerikas nehmen informelle Siedlungen bis zu 75% der bebauten städtischen Fläche ein. Sie sind aufgrund einer verstärkten Migration in die Städte oft ohne planerische Kontrolle entstanden und weisen daher große Defizite an Infrastruktur auf. Informelle Siedlungen bieten den Bewohnern oftmals die einzige Möglichkeit, in der Stadt zu wohnen. Die Nutzungsänderung von landwirtschaftlicher Fläche oder von Brachflächen zu Bauland geschieht oft ohne rechtliche Grundlage, wird aber mangels legaler Bauland-

- <sup>1</sup> Z\_GIS Centre for Geoinformatics University of Salzburg, A-5020 Salzburg
- <sup>2</sup> Austrian Research Centers (ARC) research studio /SPACE, A-5020 Salzburg
- <sup>3</sup> Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Univ. Hannover, D-30167 Hannover
- <sup>4</sup> D-81541 München
- <sup>5</sup> Austrian Academy of Science, Geographic Information Science, 5020 Salzburg
- <sup>6</sup> INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, BR São José dos Campos

angebote in vielen Fällen toleriert oder de-facto toleriert. Die Wohnverhältnisse sind aufgrund begrenzter technischer und sozialer Infrastruktur, ungesunden Wohn- und Lebensverhältnissen oft katastrophal. Wir verwenden den Begriff "informelle Siedlungen" hier sehr breit und inkludieren darin nicht nur die in der Öffentlichkeit bekannten z.T. dramatischen Ausprägungen als "slums", "Favelas" oder "Shanty towns" sondern jegliche Art von ungeplanter, unkontrollierter oder illegaler urbaner und suburbaner Siedlungstätigkeit. Die Abgrenzung zu "formal settlements" oder planmäßigen Siedlungen ist dabei unscharf. In den vorgestellten Fallstudien in Brasilien sind bewusst auch "normale" Siedlungen einbezogen da es hier große Probleme bei rein physiognomisch-deskriptiver Abgrenzung gibt (HOFMANN 2005). In dieser Synthese wird diese Rolle kritisch hinterfragt. Anhand mehrerer Fallstudien aus Brasilien und aus Afrika (Zimbabwe und Tschad/Dafur) wird das Potenzial hoch auflösender (optischer) Fernerkundungsdaten vergleichend bewertet und es werden Probleme aufgezeigt.

## 2. State of the art

Die exakte räumliche Verortung von ungeplanten Siedlungen ist lange Gegenstand der Forschung, Prinzipiell handelt es sich dabei um ein Problem, das abhängig ist vom Maßstab, resp. der räumlichen Auflösung. Der Einsatz von hoch auflösenden Fernerkundungsbilddaten aus Luftbildern (z.B. HURSKAINEN & PELLIKKA) oder Satellitendaten (vgl. MASON & FRASER 1998) wird häufig propagiert und hat sich in den letzten Jahren methodisch stark weiterentwickelt (PESARESI & BENEDIKTSSON 2000, DARE & FRASER 2001, HOFMANN 2005, HOFMANN et al. 2006, LANG et al. 2006a, LANG et al. 2006b, SCHÖPFER et al. 2007). Bei den neueren der genannten Studien werden aktuelle Fernerkundungsbilder mit räumlich hoher Auflösung und objekt-basierte Methoden (BLASCHKE et al. 2000, BLASCHKE & STROBL 2001, BURNETT & BLASCHKE 2003, CASTILLA 2003) zur Auswertung dieser Bilddaten angewendet. Aus Luftbildern kann detailliert und auf Katasterniveau der aktuelle Zustand eines Gebietes bis in einen Maßstabsbereich von ca. 1:500 erfasst werden (NEER 1999). Da aktuelle Luftbilder gerade in Regionen, in denen typischerweise ungeplante Siedlungen entstehen, nicht oder nur sehr eingeschränkt und in unregelmäßigen Abständen verfügbar sind, muss auf andere Informationsquellen zurückgegriffen werden. Hier bieten optische Fernerkundungssensoren der sog. 1 m Generation mit hohen räumlichen Auflösungen und einer spektralen Breite, die das sichtbare und das nahe infrarote Spektrum abdecken, beste Möglichkeiten für das Monitoring auch kleinräumiger urbaner Objekte auf einem hohen Maßstabsniveau (HOFMANN et al. 2006, MÖLLER & BLASCHKE 2006a, Abb. 1a-c). Insbesondere die Detektion von neuen Objekten oder eine Änderung der Flächennutzung sind hier zu nennen, über entsprechende Ontologien wird in diesem Aufsatz diskutiert. Für eine permanente, großmaßstäbige Beobachtung sensibler Regionen sind dann Auswerteverfahren sehr hilfreich, die die weitgehend automatisierte Ableitung der Änderung aus aktuellen Fernerkundungsdaten mit einer nur minimalen Überwachung und Unterstützung durch einen Interpreten ermöglichen. MASON & FRASER (1998) definieren detaillierte Anforderungen an Satellitenaufnahmen speziell für die Überwachung von informellen Siedlungen.

Für eine Detektion auf Gebäudeebene im Maßstab von ca. 1:1.000 bieten Satellitenaufnahmen der Sensoren Ikonos. Orbview und Ouickbird mit Bodenauflösungen von 0.6 - 1 m (panchromatisch) und 2.44 - 4 m multispektral gute Voraussetzungen. So konnten MOELLER & BLASCHKE 2006b zeigen, dass die Grundrisse von Gebäuden sehr exakt aus optischen Fernerkundungsdaten mit einer räumlichen Auflösung von 0.6 m abgeleitet werden können. MAYUNGA et al. (2005) nutzen sog. Snakes für eine semiautomatische Detektion von Gebäuden aus Quickbird Satellitenbilddaten und kommen zu erstaunlich hohen Lagegenauigkeiten der extrahierten Gebäudekanten. MOSCH (2005) stellt einen Ansatz vor, mit dessen Hilfe aus hoch aufgelösten Quickbird-Daten Gebäude direkt als 3D Objekte extrahiert werden können. MOELLER & BLASCHKE 2006a konnten anhand von fusionierten Bilddaten des Quickbird Sensors im Gebiet der Stadt Phoenix, Arizona, mehrere spektrale Indizes testen, die zur robusten Detektion von geänderten Objekten (hier Gebäuden und Strassen) geeignet sind. In Abb. 1 sind Beispiele für diese Indizes visuell dargestellt. LANG et al. (2006a und 2006b) erarbeiteten übertragbare Regelsätze, die die automatische Detektion von Behausungsstrukturen in Flüchtlingslagern in Afrika und die damit verbundene Bevölkerungsabschätzung aus Quickbird bzw. Ikonos Daten ermöglichen. SCHÖPFER et al. (2007) konnten am Beispiel Harare, Zimbabwe, zeigen, dass ein schneller, objekt-basierter Change Detection Ansatz für informelle Siedlungen mit Quickbird-Daten möglich ist.



R=IR, G=rot, B=grün, Größe: 501m x 501m

Abb. 1a -c: Quickbird Colorinfrarot Bild, pan-geschärft, Änderung der Visualisierung als Hauptkomponententransformation (PCA), aus: Moeller und Blaschke 2006.

## 3. Fallstudien

#### 3.1. Rio de Janeiro

#### Problemstellung

Eine Erfassung von so genannten Favelas in Rio de Janeiro mittels Fernerkundungsdaten wirft aufgrund des heterogenen Erscheinungsbilds und unterschiedlichster Physiognomie Probleme auf. Seit ihrem ersten Aufkommen vor mehr als 100 Jahren sind in Rio über 750 Favelas entstanden, deren Größe zwischen nur wenigen Hütten und ganzen Stadtteilen mit schätzungsweise bis zu 250.000 Einwohnern variiert. Insbesondere die älteren und

zentrumsnahen Favelas haben teilweise inzwischen eine Konsolidierung erfahren, in deren Verlauf die ansonsten für informelle Siedlungen typischen temporären Behelfsbehausungen ersetzt wurden durch Backsteinhäuser, die vier und mehr Stockwerke hoch sein können. Aus fernerkundlicher Sicht lassen sich diese Favelas nur sehr schwer von anderen, formellen Stadtteilen unterscheiden.

#### Daten und Forschungsansatz

In einer Studie wurde eine IKONOS-Szene von Rio vom 16. Juni 2004, auf die ein Pansharpening-Algorithmus angewendet wurde, um eine Auflösung vom 1m auch in den Multispektralkanälen zu erzielen, mit Hilfe der Software Definiens Developer 5 analysiert. Die dabei verwendeten Merkmale wurden so ausgewählt, dass sie potentiell auch auf andere Regionen übertragen werden können. Zunächst wurden Siedlungen allgemein klassifiziert und dann versucht, aus diesen die informellen Siedlungen zu extrahieren. Es wurden dabei die Annahmen getroffen, dass Siedlungen einen relativ geringen Vegetationsanteil haben und kompakt (im Gegensatz z.B. zu länglichen Straßen) sowie relativ stark texturiert sind. Informelle Siedlungen weisen zudem folgende Merkmale auf: kleinere Gebäude, geringer Anteil an roten und hellen Dächern sowie eine gewisse Entfernung zu privaten als auch öffentlichen Schwimmbädern. Weiterhin wurde berücksichtigt, dass formelle Siedlungen nicht komplett von informellen Siedlungen umgeben sind.



Abb. 2: Catumbi im Großraum Rio de Janeiro und angrenzende Favelas einmal klassifiziert (links) und mit transparenter Überlagerung der Abrenzungsergebnisse. Einige formelle Siedlungsbereiche wurden fälschlicherweise als informell klassifiziert.

Mit dieser automatischen Klassifikation konnte eine Genauigkeit von insgesamt 86% erreicht werden. Dieses Ergebnis ist jedoch sehr unterschiedlich für formelle und informelle Siedlungen: während Siedlungen generell recht zuverlässig erfasst werden können (mit einer User's Accuracy von 87% und einer Producer's Accuracy von 81%), sind Favelas häufig nur schwer von formellen Siedlungen zu unterscheiden – hier liegt die User's Accuracy nur bei 60%, die Producer's Accuracy allerdings bei 100%. In vielen Fällen hätte jedoch auch ein menschlicher Interpret Probleme mit der genauen Abgrenzung. Spektrale Informationen alleine sind somit für die Erfassung von Favelas in Rio de Janeiro nur bedingt geeignet. Eine gleichzeitige Verwendung

von zusätzlichen Fernerkundungsdaten, wie digitale Höhenmodelle, könnte möglicherweise eindeutigere Ergebnisse zur Abgrenzung von Favelas liefern, da hierdurch weitere Faktoren berücksichtigt werden können, wie z.B. die Besonderheit in Rio, dass sich etliche Favelas auf relativ steilen Hügeln befinden.

#### 3.2. Belo Horizonte, Brasilien

In zwei Stadtteilen (Belvedere und Buritis) von Belo Horizonte (Landeshauptstadt von Minas Gerais, Brasilien) wurde eine multi-temporale Klassifizierung von zwei Quickbird Satellitenbildern durchgeführt, wobei das OBIA-Konzept (Object-based image Analysis, HAY & CASTILLA 2006, BLASCHKE & LANG 2006) berücksichtigt wurde, zur Kartierung der Bodenbedeckung. Nach der geometrischen Korrektur beider Datensätze und der Bildsegmentierung, wurde die thematische Klassifizierung durchgeführt (s. Abb. 3) unter Anwendung des eCognition Softwarepakets. Der Vergleich beider Klassifizierungen (von 2002 und 2004) zeigt einige signifikante Änderungen. Diejenigen Klassen die Versiegelung andeuten haben flächenhaft zugenommen auf Kosten insbesondere der Baum- und Grass-Vegetation. Brachen (Bare soil) haben ebenso zugenommen, ein Indiz dafür dass diese Grundstücke für den Bau von Hochhäusern freigegeben wurden. Auf Grund weiterer Informationen von der Stadtverwaltung Belo Horizonte (Geologisch-geotechnische Karte, Karte der geologischen Risiken für Hochbauten, städtische Bestimmungen für den Bau von Häusern sowie Karten mit den Einfallswinkeln und Richtungen der Hänge (slope steepness and orientation) wurden mehrere räumliche Auswertungen/Inferenzen von Interesse für die Stadtplanung gemacht. So konnten z.B. die Bereiche der Bodenversiegelung, potenzieller Hangrutschungen, als auch die Gebäude die nicht vorschriftsmäßig gebaut wurden genau festgestellt werden. Aufgrund einer ausführlichen Analyse dieser Informationen wurde eine Karte der potentiellen Verwundbarkeit der Bewohner und des Eigentums erstellt, wo die Informationen der geologischen Risiken, Bodennutzung, Hangwinkel und städtische Bauvorschriften zusammengefasst sind. Als Fortsetzung dieses Vorhabens ist die Kartierung der sog. "informellen Siedlungen" ("Favelas") in Stadtvororten vorgesehen. Dabei muss insbesondere auf die Texturänderungen näher eingegangen werden, auf Grund der verschiedenen Größen der Häuser und Hütten als auch auf das unterschiedliche Material der Dächer. Die häufige Konfusion zwischen den Klassen "Ceramic tiles" und "Bare soil" muss beigelegt werden mit der Anwendung neuer Fuzzy-Klassifizierungsregeln, unter besonderer Berücksichtigung von Form und Größe der Bauten in den Favelas.



Abbildung 3: Thematische Klassifizierung beider untersuchten Stadtteile in Belo Horizonte 2004.



Abbildung 4: Karte der potentiellen Verwundbarkeit der Bewohner und des Eigentums.

#### 3.3. Harare, Zimbabwe

#### Problemstellung

Harare, die Hauptstadt Zimbabwes mit knapp 1,9 Millionen Einwohnern, ist das Zentrum von Wirtschaft und Kultur des Landes. Die Innenstadt ist aufgrund der britischen Kolonialzeit von modernen Bürogebäuden, Einkaufspassagen und alten Häusern europäisch geprägt. In den Vororten wechseln sich reiche Villen-Viertel mit "High density areas" (Townships) ab. Am 19. Mai 2005 startete in Zimbabwe die Operation Murambatsvina (*Restore Order*) mit der gewaltsamen Räumung dieser Wohnviertel. Aufgrund der langen Ansässigkeit von den Bewohnern in den Townships und der Etablierung derselbigen sind diese informellen Strukturen schwer vom eigentlichen Siedlungsraum abzugrenzen. Ziel der Studie war, die Erfassung der informellen Siedlungen und eine Abschätzung der betroffenen Bevölkerung.

#### Daten und Forschungsansatz

Für die in Harare durchgeführte Studie wurden QuickBird Daten vom August 2004 sowie Juni/August 2005 verwendet, welche die Townships Mbare und Glen Norah vor und nach der Operation Murambatsvina abdecken (UTTENTHALER et al., 2007). Die Daten, auf Basis einer SPOT-5 Szene (10 m panchromatisch) mit rationalen Polynomialkoeffizienten und einem 90 m SRTM Höhenmodells orthorektifiziert, wurden zur weiteren Bildverbesserung mit Hilfe des panchromatischen Kanals auf 0,6 m geschärft.

Für die objekt-basierte Bildanalyse wurde mit der in Definiens Developer implementierten Cognition Network Language (CNL) für die Szene von 2004 ein Klassifikationsregelwerk erstellt. Diese modulartig aufgebaute Programmiersprache ermöglicht die zyklische Verarbeitung von Segmentierungs- und Klassifikationsmethoden (TIEDE & HOFFMANN, 2006; SCHÖPFER et al., 2007). Der Benutzer entwickelt dabei einen komplexen, jedoch transparenten Workflow und überwacht gleichzeitig den gesamten Prozess. Die Beschreibung der Klassen, mit dem Fokus informelle von formellen Siedlungen zu unterscheiden sowie Einzelgebäude zu detektieren, basierte neben der spektralen Information vor allem auf räumlichen Merkmalen sowie Form- und Textureigenschaften. Informelle Siedlungen waren vor allem durch die verwendeten Baumaterialien der Häuser (Reflexion), die Größe der Dächer bzw. die dichte und zugleich nicht lineare Anordnung der hüttenartigen Behausungen zu beschreiben. Der entwickelte Regelsatz anschließend auf die QuickBird-Szene wurde von 2005 übertragen und eine Veränderungsanalyse durchgeführt.

Die Klassifikationsergebnisse wurden mit Hilfe einer zuvor mit ArcGIS 9.2 erstellten manuellen Abgrenzung der betroffenen Gebiete sowie der Digitalisierung von Einzelgebäuden auf deren Genauigkeit überprüft. Im Untersuchungsgebiet Mbare konnten (1) visuell 98 Hütten und (2) automatisch 102 Hütten detektiert werden. BROWN (2001) beschreibt in ihrer Arbeit, dass ca. 12 Personen in einer Hütte wohnen; diese Zahl wurde von uns aufgrund der geringen Größe der Hütten auf 8-10 Personen verringert. Die Berechnungen ergeben, dass dem erfassten Teilgebiet von Mbare zwischen 800 und 1000 Personen leben. In Glen Norah wurden (1) 63 Hütten visuell und (2) 135 Hütten automatisch erfasst. Die durchgeführte Genauigkeitsüberprüfung mit jeweils 100 entnommenen Stichproben erzielte eine Klassifikationsgesamtgenauigkeit bei (1)

informellen Siedlungen von 77 % und (2) Einzelgebäudeextrahierung von 79 % (UTTENTHALER et al. 2007)

#### 3.4. Cape Town - Nyanga/Crossroads, Südafrika

Während in Rio de Janeiro eine klare Abgrenzung Informeller Siedlungen aufgrund der allgemein vorherrschenden heterogenen Siedlungsstruktur nicht immer leicht ist, zeichnet sich im südlichen Afrika - insbesondere in der Republik Südafrika – ein klareres Bild ab: hier orientieren sich unterschiedliche Siedlungsstrukturen i.d.R. an bereits gegebenen natürlichen oder anthropogenen Grenzen, wie z.B. Flussläufe oder Straßenzüge. Da nicht zu letzt auch wegen der erzwungenen Segregation während der Apartheid, die Grenzen zwischen verschiedenen Siedlungsstrukturen in den meisten Fernerkundungsdaten der 1m-Generation klar erkennbar sind, ist eine allgemeine räumliche Abgrenzung solcher Strukturen und eine Abgrenzung informeller Siedlungen im Speziellen, visuell und auch automatisiert leicht möglich. Entsprechend lassen sich in den sehr hoch aufgelösten Bilddaten auch ohne Zuhilfenahme zusätzlicher (GIS-) Daten relativ einfach gut geeignete Bildsegmente - sei es automatisch, sei es manuell - erzeugen. Da diese Bildsegmente zur weiteren Analyse der Bilddaten bzw. zur Detektion informeller Siedlungen verwendet werden, besteht die Problemstellung für die Erfassung informeller Siedlungen im südlichen Afrika weitestgehend darin, geeignete identifizierbare und quantifizierbare Indikatoren auf Basis der Bildsegmente zu bestimmen, mit deren Hilfe eine automatisierte und möglichst übertragbare Erfassung informeller Siedlungen möglich ist.

Entsprechend wurde zunächst eine allgemeine funktionale und phänomenologische Ontologie informeller Siedlungen erstellt, anhand derer typische, segmentbasierte Parameter und Wertebereiche abgeleitet werden sollten, die in entsprechender Software (hier eCognition 4.0) umsetzbar sind. Als Zwischenschritt wurde aus der funktionalen phänomenologischen Ontologie eine Ontologie aus Sicht der Fernerkundung erstellt - quasi ein (hierarchischer) Interpretationsschlüssel, die dann in einem entsprechenden Fuzzy-Regelsatz in eCognition 4.0 realisiert wurde (vgl. Abbildung 5).

Zur eigentlichen Extraktion informeller Siedlungen wurden IKONOS pan-sharpened Daten verwendet. Dabei zeigte sich, dass nicht alle Indikatoren und Parameter entsprechend der in Abbildung 5 dargestellten Ontologie verwendet werden konnten. So konnten beispielsweise die eigentlichen Siedlungselemente – nämlich die einzelnen Hütten – nicht direkt aus den Daten extrahiert werden. Jedoch war es möglich aufgrund des Kontrastes einzelne kleine Schatten (oder auch andere dunkle Objekte in der gleichen Größenordnung) so zu identifizieren, dass damit die Struktur informeller Siedlung beschreibbar und quantifizierbar wurde. Zusammen mit dem Indikator *Vegetationsanteil* und *irreguläres Straßennetz*, der durch die mittlere Länglichkeit<sup>1</sup> der Unterobjekte eines Objekts indirekt beschrieben wird, gelang es informelle Siedlungen in der verwendeten Szene mit einer thematischen Genauigkeit von 71 % zu extrahieren. Durch Anwendung eines iterativen Prozesses, mit dessen Hilfe eingeschlossene, formelle Siedlungen innerhalb informeller Siedlungen anwendet, konnte die thematische Genauigkeit auf 80 % erhöht werden (vgl. HOFMANN 2005).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> In eCognition ausgedrückt durch das Merkmal Asymmetry



Abbildung 5: Ontologie informeller Siedlungen aus fernerkundlicher Sicht mit entsprechenden quantifizierbaren und aus den Bilddaten ableitbaren Indikatoren.



Abbildung 6: Ausschnitt aus der IKONOS Szene Nyanga/Crossroads. Transparent überlagert sind automatisch extrahierte informelle Siedlungen.

#### 3.5. Refugee camps – Beispiele aus Tschad/Sudan

#### Problemstellung

Bürgerkriege und Übergriffe auf die Zivilbevölkerung mobilisieren eine große Anzahl von Flüchtlingen (> 8 Millionen bis Ende 2005, UNHC 2005) und zusätzlich viele internally displaced people (IDPs). Anhand von zwei verschiedenen Flüchtlingslagern (Goz Amer, Tschad + Lukole, Tanzania) sollen Möglichkeiten aufgezeigt werden, inwieweit Fernerkundungsdaten Extraktion Behausungen zur semi-automatisierten von und darauf aufbauender Bevölkerungsabschätzung herangezogen werden können. Das Flüchtlingslager Goz Amer liegt ca. 100 km westlich der Grenze Tschad/Sudan. Die Anzahl der Flüchtlinge aus der Darfur Region wurde vom UNHCR 2004 auf 18.341 geschätzt (UNHCR Camp statistics, August 2004). Das Flüchtlingslager Lukole (bestehend aus Teil A + B) im Westen Tanzanias beherbergt, trotz mehr als 10 jährigem Bestehen, immer noch ca. 50.000 Menschen (WFP & UNHCR, 2005), wovon die meisten während des Konflikts zwischen Hutu und Tutsi 1993/94 aus Burundi geflohen sind (LANG et al., 2006a)

Während im Flüchtlingslager Goz Amer noch von flüchtigen Behausungsstrukturen ausgegangen werden kann (hauptsächlich Zeltstrukturen, ibid.), kann im Flüchtlingslager Lukole aufgrund der 10+ Jahre Existenz und der eher dauerhaften Strukturen wie Hütten und kleinere Häuser (LANG et al. 2006b) durchaus von informellen Siedlungen gesprochen werden.

#### Daten und Forschungsansatz

Für die Informationsextraktion im Flüchtlingslager Goz Amer wurden Quickbird Daten von Dezember 2004 herangezogen (pan-geschärft, 0,6 m GSD), für Lukole standen IKONOS Daten vom September 2000 zur Verfügung (panchromatisch 1 m, multispektral 4m GSD). Der von LANG et al. (2006a) entwickelte Workflow zur Informationsextraktion aus Fernerkundungsdaten wurde für beide Beispiele angewendet. Kernelement der Informationsextraktion bildet dabei die objekt-basierte Bildanalyse (OBIA, siehe Kap. 2 und 3.2)). Hierbei wurden mit der Cognition Network Language (CNL) wissensbasierte Regelsätze zur zyklische Modellierung und Extraktion von Zielklassen im Flüchtlingslager Goz Amer erarbeitet. Für Übertragung dieser Regelsätze auf das Flüchtlingslager Lukole unter Berücksichtigung anderer Zielklassen (unterschiedliche Behausungsstrukturen) und anderer Daten (IKONOS) waren kleinere Modifikationen nötig.

Die Extraktionsergebnisse wurden mit Hilfe von visuellen Interpretationen verglichen, da in diesen Krisenregionen eine andere Form des *ground truthing* massiv erschwert ist. Für das gesamte Gebiet des Flüchtlingslagers Goz Amer konnten 80 % der Zelte extrahiert werden. Eine Abschätzung der Bevölkerung durch die Annahme von verschiedenen Familiengrößen je Behausungstyp, ergab eine Schätzung von ca. 20.300 Bewohnern (LANG et al. 2006a). Dies entspricht einer leichten Überschätzung der offiziellen Zahlen 4 Monate vor der Satellitenbildaufnahme (18.341, UNHCR August 2004). Die Ergebnisse im Flüchtlingslager Lukole wurden mit visuellen Interpretationen für 3 Teilbereiche überprüft. Die Ergebnisse schwanken zwischen 88,5 % und fast 96 % korrekt extrahierter Behausungsstrukturen (LANG et al. 2006b). Trotz etwas geringere GSD der Daten (Quickbird vs. Ikonos) konnten im Bereich Lukole bessere Ergebnisse erzielt werden, was in erster Linie auf die Behausungsstrukturen mit schon informellen Siedlungscharakter zurück zuführen sein dürfte.



Abb. 7: 3D Visualisierung und quantitative Analyseeinheiten. Die Höhe der Zellen repräsentiert die Zahl der extrahierten Behausungen für jede 100 m x 100 m Raster Einheit. Teilbereich aus dem Flüchtlingslager Lukol (A); (aus LANG et al 2006b)

## 4. Interpretation der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen, dass die aktuelle Generation hoch auflösender optischer Satelliten ("1-m Generation") eine sehr gute Ausgangsbasis für das Monitoring informeller Siedlungen und – noch allgemeiner – schnell sich verändernder urbaner und sub-urbaner Siedlungsstrukturen liefert. Die räumlichen Auflösungen von ca. 1 m oder darunter im panchromatischen und 2,5 bis 5m im multi-spektralen Bereich können als ausreichend angesehen werden. Dies ist eine ganz andere Situation als in den 1900er Jahren als die User immer wieder die räumliche Auflösung als limitierend empfunden hatten. In den einfach gelagerten Fällen, wo sich die Siedlungsstrukturen weitgehend durch eine in eine zweidimensionale Fläche projizierte Draufsicht erklären lassen, sind die Fernerkundungsdaten auch zur inneren Differenzierung ausreichend. Dort wo die Definition bzw. die Kategorisierung nicht allein deskriptiv "von oben" determiniert ist sondern komplexe 3-dimensionale Merkmale aufweist oder von siedlungsgenetischen Merkmalen und/oder qualitativen Veränderungen determiniert wird, sind Fernerkundungsdaten allein nicht ausreichend, um eine Kategorisierung vorzunehmen und Veränderungen zu qualifizieren. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse zusammenfassend bewertet.

Zukünftige optische Satellitensensoren der "Post 1m Klasse" warten mit räumlichen Auflösungen von 0.5m im panchromatischen, resp. 2.0m im multispektralen Modus auf (Geoeye). Prinzipiell sollte man daher erwarten, dass sie damit damit noch besser geeignet wären, informelle Siedlungen eindeutig zu identifizieren, zu klassifizieren und zu überwachen.

	Canage/am	D ärmal	Detailtion informalian	Varën damma aan	A muserlaur con
	Sensor/en	Kaumi.	Detektion informener	veranderungen	Anmerkungen
		Auflosung	Stedlungen	klassifizierbar	
Fallstudie 1:	IKONOS	\$	zu 60% identifiziert		Abgrenzung zu formellen
Rio de Janeiro			(User's Accuracy),		Siedlungen aufgrund
			Producer's Accuracy		Konsolidierung schwierig
			100%		5 6
Fallstudie 2:	OuickBird	e la	noch nicht erfolgt	Änderungen auch	Bisher auf geplane Sied-
Belo Horizonte	<b>L</b>	12-		nach nur 2 Jahren	lungen angewandt mit
Delo Homzonie				gut detektierbar	Schwerpunkt change
				gut detektierbai	detection
E 11 + 11 - 0	0.1011		0 11		
Fallstudie 3:	QuickBird	6	Overall accuracy:		Ubergangsbereichen
Harare,			Informelle Siedlungen		zwischen Hütten und offener
Zimbabwe			77 %; Einzelgebäude-		Boden problematisch
			extrahierung 79 %		
Fallstudie 4:	IKONOS	\$	Ca. 80% overall		Abgrenzung einfach, da fast
Cape Town -			accuracy		keine Übergangszonen oder
Nyanga/Crosssr					Mischformen: Ergebnisver-
oade					besserung durch Umsetzung
oaus					von Sogragations Kritarion
					von Segreganons-Kriterien
					in Regelsatz.
Fallstudie 5:	QuickBird	6	Behausungsextraktion:		Abschätzung von
Flüchtlingslager	Ikonos		80 % - 96%, je nach		Bevölkerungszahlen aus
			Sensor und		Behaussungsstrukturen
			Behausungsstruktur		schwierig. Ground truthing
					massiv erschwert

Tab. 1: Zusammenfassende Bewertung der vorgestellten Fallstudien hinsichtlich der Möglichkeiten der Satellitenfernerkundung für das Monitoring und Safeguarding

Der Vergleich der verschiedensten Studien in diesem Beitrag führt jedoch zu der Schlussfolgerung, dass die räumliche Auflösung gar nicht limitierend ist. Weitere Möglichkeiten ergeben sich durch die Kombination mit SAR (Synthetic Aperture Radar) Bilddaten. Während diese bisher meist räumlich geringer aufgelöst als hilfreiche Zusatzinformation zur Verfügung standen, um z.B. Dachmaterialien zu unterscheiden und Strukturen zu kartieren (z.B. DEKKER 2003), wird von der Kombination mit Daten des TerraSAR-X, der im zweiten Halbjahr 2007 erste Bilddaten aufzeichnen soll eine Art Quantensprung im Monitoring erwartet. Die Verfügbarkeit an Daten steigt damit natürlich in Gebieten mit häufiger Wolkenbedeckung. Vor operationellen Anwendungen gilt es jedoch erst noch Algorithmen und Methoden zu entwickeln, die Datensätze beider Sensorsysteme so optimal kombinieren, dass die gewünschten Objekte daraus mit hoher Sicherheit abgeleitet werden können.

## Danksagung

Teile der Arbeiten wurden im Rahmen des EU FP6Network of Excellence GMOSS (<u>http://gmoss.jrc.it</u>, SNE3-CT-2003-503699, 2004-2008) durchgeführt. Die dabei verwendeten Daten wurden zur Benutzung innerhalb von GMOSS freigegeben.

## Literatur

- ARAÚJO, E.H.G., 2006 Análise multi-temporal de cenas do satellite Quickbird usando um novo paradigma de classificação de imagens e inferências espaciais: estudo de caso Belo Horizonte (MG), 159 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – INPE. <u>http://mtcm13.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/07.24.19.43/doc/paginadeacesso</u>
- BLASCHKE, T., LANG, S., LORUP, E., STROBL, J., ZEIL, P. (2000): Object-oriented image processing in an integrated GIS/remote sensing environment and perspectives for environmental applications. In: Cremers, A. & K. Greve (eds.): Environmental Information for Planning, Politics and the Public. Metropolis Verlag, Marburg, vol 2, 555-570.
- BLASCHKE, T. & STROBL, J. (2001): What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS. GIS – Zeitschrift f
  ür Geoinformationssysteme 14 (6): 12-17.
- BLASCHKE, T. & LANG, S., 2006: Object based image analysis for automated information extraction a synthesis. Measuring the Earth II ASPRS Fall Conf. 6-10 Nov. 2006, San Antonio, Texas, CD-ROM.
- BLASCHKE, T., BURNETT, C. & PEKKARINEN, A., 2004: New contextual approaches using image segmentation for object-based classification. In: De Meer, F. and de Jong, S. (eds.): Remote Sensing Image Analysis: Including the spatial domain. Kluver Academic Publishers, Dordrecht, pp. 211-236.
- BROWN, A., 2001: Cities for the urban poor in Zimbabwe.
- CASTILLA, G., 2003: Object-oriented analysis of remote sensing images for land cover mapping: conceptual foundations and a segmentation method to derive a baseline partition for classification. Ph.D. Thesis, Polytechnic University of Madrid. <u>http://www.montes. upm.es/Servicios/biblioteca/tesis/GCastillaTD\_Montes.pdf.</u>
- DARE, P.M. & C.S. FRASER, 2001: Mapping informal settlements using high resolution satellite imagery. Int. Journ. of Remote Sensing 22 (8): 1399-1401.
- DEKKER, R., 2003: Texture analysis and classification of ERS SAR images for map updating of urban areas in the Netherlands. IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens., **41**: 1950 -1958.
- HEROLD, M., M. E. GARDNER, Dar A. ROBERTS, 2003: Spectral Resolution Requirements for Mapping Urban Areas. IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens., 41: 1907 -1919.
- HAY, G.J. & G. CASTILLA, 2006: Object-based image analysis: strengths, weaknesses, opportunities and threats (SWOT). Intern. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences vol. XXXVI-4/C42, CD ROM.
- HOFMAN, P., STROBL, J., BLASCHKE, T. & KUX, H., 2006: Detecting informal settlements from QuickBird data in Rio de Janeiro using an object oriented approach. Intern. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and spatial information sciences, Vol. XXXVI-4 / C42.
- HOFMANN, P., 2005: Übertragbarkeit von Methoden und Verfahren in der Objektorientierten Bildanalyse – das Beispiel informelle Siedlungen. Diss. Univ. Salzburg.
- HURSKAINEN, P & P. PELLIKKA, 2004: Change detection of informal settlements using multi-temporal aerial photographs. The case of Voi, SE-Kenya. In: Proc.of the 5<sup>th</sup> AARSE Conference, CD-ROM.
- KUX, H.J.H., ARAÚJO, E.H.G., DUPONT, H.S.J.B., 2007: Contribution of Remote Sensing and GIS Techniques to Geological/Geotechnical Problems at Urban Planning Issues: Case Study Belo Horizonte (Minas Gerais State, Brazil) Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft (ZDGG), Heft 158(1) (*im Druck*).

- LANG, S., D. TIEDE & F. HOFER, 2006a: Modeling ephemeral settlements using VHSR image data and 3D visualisation – the example of Goz Amer refugee camp in Chad. In: PFG -Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformatik, 4/2006: 327-337.
- LANG, S., D. TIEDE & G. SANTILLI, 2006b: Varying sensors and algorithms an information delivery approach for population estimation in African refugee camps. In: Proc. 6th African Assoc. of Remote Sensing of the Environment Conf. (AARSE), Oct 30 - Nov 2, Cairo, Egypt.
- MASON, S. O. & FRASER, C.S., 1998: Image Sources for informal settlement management. The Photogrammetric Record 16 (92): 313-330.
- MAYUNGA, S. D., ZHANG, Y. & COLEMAN, D. J. 2005: Semi-automated buildings extraction utilizing Quickbird imagery. Intern. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and spatial information sciences, Vol. XXXVI, 3/W24, 131-136.
- MÖLLER, M. & BLASCHKE, T., 2006a: Urban Change Extraction from High Resolution Satellite Imagery. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and spatial information sciences, Vol. XXXVI-2, 151-156.
- MÖLLER, M. & BLASCHKE, T., 2006b: GIS-gestützte Bildanalyse der städtischen Vegetation als Indikator urbaner Lebensqualität, in: Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation (PFG) 1/2006, S. 19-30.
- MOSCH, M., 2005: 3D-Gebäudeextraktion aus Satellitenbildern suburbaner Regionen, Dissertation, Freiburg, http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/2648/pdf/MoschQBExtraction.pdf
- NEER, J. T., 1999: High Resolution Imaging from Space A Commercial Perspective on a Changing Landscape. Intern. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXXII (7C2): 132-143.
- PESARESI, M. & BENEDIKTSSON, J.A., 2000: "Classification of Urban High-Resolution Satellite imagery Using Morphological and Neural Approaches", Proc. IGARSS'00, pp.3066-3068,
- SCHÖPFER, E., TIEDE, D., S. LANG, & ZEIL, P., 2007: Damage assessment in townships using VHSR data - The effect of Operation Murambatsvina / Restore Order in Harare, Zimbabwe. In: Proc. Urban Remote Sensing Joint Event. CD-ROM.
- TIEDE, D. & HOFFMANN, C., 2006: Process oriented object-based algorithms for single tree detection using laser scanning data. EARSeL-Proceedings of the Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry, 14th-15th Feb 2006, Vienna, 151-156.
- UNHCR (2004): Refugee map; http://www.unhcr.ch/chad/ (April 2004)
- UNHCR, 2005. Statistical overview of populations of refugees, asylum-seekers, internally displaced persons, stateless persons, and other persons of concern to UNHCR, available online under www.unhcr.org (accessed 04/2007)
- UTTENTHALER, A., SCHÖPFER, E. & LANG, S., 2007: Veränderungsanalyse informeller Siedlungen in Townships von Harare/Zimbabwe auf Basis von höchstauflösenden Satellitenbilddaten. In: J. STROBL, BLASCHKE, T. & GRIESEBNER, G. (Hrsg.): Angewandte Geoinformatik 2007. Heidelberg: Wichmann.
- WFP & UNHCR, 2005. Joint Assessment Mission, Great Lakes Region Tanzania, 8-14 November 2005. Final Report.

# Modelling of soil moisture in agricultural areas using ENVISAT ASAR-data

## SANDY PEISCHL<sup>1</sup>, RICHARD GLOAGUEN<sup>1</sup> & IRMGARD NIEMEYER<sup>2</sup>

Abstract: In the course of rising environmental awareness and the technical progress in remote sensing systems, imaging radar is increasingly used for practical applications concerning monitoring and modelling aspects. In this context the continuously providing of frequently area-wide data is prerequisite. A significant environmental parameter for the understanding of global water, energy and carbon cycles is the surface soil moisture content especially with regard to flood risk management and water balance modelling.

Here, we propose a robust and easy method in order to retrieve surface soil moisture from single co-polarized ASAR-data in vegetated areas. We applied an algorithm based on the semi-empirical inversion scheme of LOEW et al. (2006) in order to obtain valid results in agricultural land.

Numerous studies showed a strong relation between microwave remote sensing and topsoil water content expressed by the backscatter coefficient (<sup>a</sup>). This key variable results - apart from the main sensor attributes known as polarisation, frequency and incidence as well as depression angle – from the target realities: surface roughness, vegetation cover and dielectric properties of the scatterer. The latter being highly dependent on volumetric water content can be used as a linkage between backscatter coefficient and soil moisture. Concerning the soil moisture modelling of this study, the surface roughness is incorporated by using given parameters of the LOEW et al. inversion scheme distinguished for different land-types. We assume that surface roughness and soil types have low rates of variation. Furthermore, the procedure involves ortho-rectification using Digital Elevation Models (DEM), normalization of incidence angles and the calculation of the backscatter coefficients from raw SAR-data.

Due to the high alteration of surface soil moisture in space and time, the radar remote sensing technique is a good methodology to get a large-area estimate of the topsoil water storage ability with regard to climate monitoring and flood forecasting in mesoscale areas.

## 1 Introduction

After the publishing of the new World Public Report "Climate Change 2007" in February 2007 the ecological awareness among the public has tremendously increased. Especially the rising numbers of floods and droughts in the last few years became the focus of attention due to the direct implications on people. Thus, scientists working on climate forecasting have to involve much more environmental determinants.

Especially the knowledge of the soil moisture is a precondition for the analysis of past, current and future ecological situations and for the installation of early warning systems (CHOUDHURY et

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Sandy Peischl and Richard Gloaguen are with the: Remote Sensing Group, Department of Geology, Faculty of Geoscience, Geotechnology and Mining, Freiberg University of Mining and Technology (TUBAF), D-09596 Freiberg (e-mail: Sandy.Peischl@gmail.com; gloaguen@geo.tu-freiberg.de)

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Irmgard Niemeyer is with the: Department of Mine-Surveying and Geodesy, Faculty of Geoscience, Geotechnology and Mining, Freiberg University of Mining and Technology (TUBAF), D-09596 Freiberg (e-mail: Irmgard.Niemeyer@tu-freiberg.de)

al., 1995). Concerning that water stress plays an important role for estimations and modelling of interactions between atmosphere, hydrosphere and biosphere, soil moisture is a significant environmental parameter in the "near-surface atmospheric variability" (LU & MEYER, 2002). The traditional methods of measuring soil moisture are mainly characterised by point measurements which are very time-consuming and costly (SCHMUGGE et al., 1980). So nowadays microwave remote sensing provides a technique to gain data of the highly, spatial-variable soil moisture patterns of the topsoil at a relatively low-cost level and continuously (LU & MEYER, 2002).

## 2 Study Background

The present investigations are made within the scope of the EMTAL project (Management of Catchment Areas with Reservoirs in Mountainous Regions) in order to improve water balance and erosion models using almost real time soil moisture maps. The agricultural study areas are located in the Erzgebirge of Saxony, Germany.

## 2.1 Test Sites

Considering the morphological aspect of the region, the Erzgebirge is a huge thrust fault which is tilted towards northwest. The north of the massif is situated about 300 m height above sea level and rises up to 800 - 1000 m above sea level towards south (HENNINGSEN & KATZUNG, 2002).

The soil in the western and middle parts of the Erzgebirge is mainly made up of weathered granite. Soils on phillitic basement have typically a great portion of clay material and the fast weathered gneiss in eastern Erzgebirge leads more to brown soils. HEILMANN et al. (1993) distinguish between two classes of soil characters related to the climatic differentiation in height and the variety of soil genesis based on relief and substrates. One class comprises the lower and middle reaches and the second one the upper and crest reaches. Due to the minor relief energy luvisols in association with impeded drainage are typical for the first class. The thickness of the quarternary, overlying layers decreases with altitude. Hence, in the upper and crest reaches soil water is mainly backed up at slopes and the genesis of podzols increases.

With regard to the agricultural used test sites, the soil is characterised by stagnant properties such as planosols or stagnic cambisols and areas near rivers and streams by gleysols and fluvisols.

## 2.2 Dataset

The dataset is provided by ENVISAT. The satellite is an advanced earth observation system which was launched on March 1, 2002 by the European Space Agency (ESA). The satellite payload consists of a multidisciplinary set of instruments either for measuring atmospheric conditions or for measuring surface parameters through the atmosphere.

The experimental data of this study is deliver ed by the Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) which operates at C-Band with an approximate geometric resolution of  $30 \times 30$  m in Precision Image Mode. The choice of the ordered scenes is based on precipitation data of the German National Meteorological Service "DWD". With regard to s oil moisture modelling, each pair of the same year corresponds approximately to a scene before and after a precipitation event.

## 3 Soil Moisture Modelling Approach

The generation of soil moisture maps of the test sites is based on the semi-empirical inversion scheme developed by LOEW et al. (2006). The algorithm is a modification of a former model adapted to ERS data (ROMBACH & MAUSSER, 1997) in order to derive surface soil moisture also from ENVISAT ASAR data. Its applicability is proven by many scientific studies and showed in comparison with in-situ measurements accuracy rates of about 4-7 vol.% = rms error (BACH & MAUSSER, 2003). Furthermore, the inversion scheme has been validated for different land-uses such as bare soils, root crops, harvested field, grasslands and cereals. The limited number of required model parameters is a main advantage for application.

#### 3.1 Data Pre-Processing

Due to the geometry of SAR images and the beam to surface orientation, significant geometric and radiometric distortions can occur within the data. The imaging principle of measuring the travel time of signals between transmission and reception results in an image with relative positions of the scanned objects. The processing of the signal propagation delay of sloping and faceted surfaces induces local distortions. Hence, the determined range distances of the illuminated scatterer have to be connected with the real surface relief. Using a digital elevation model (DEM), the ASAR images are ortho-rectified. The resulting image brightness values  $\beta^0$  which are converted afterwards into backscatter coefficients  $\sigma^0$  are therefore corrected for the topography caused changes.

In order to reduce effects of speckle in the images, a speckle filter with a box size of 5 x 5 image pixels was applied, additionally.

#### 3.2 Soil Moisture Inversion Algorithm

The soil moisture derivation consists of two main steps: conversion from backscatter coefficient to dielectric constant and afterwards to soil mois ture values. The first part of the model is based on an empirical database from test sites in Germany (L  $_{OEW}$ , 2006). The second part can be solved by application of dielectric mixture models and empirical curves.

#### 3.2.1 Conversion Backscatter Coefficient to Dielectric Constant

The relation between backscatter coefficient and the real part of the dielectric constant  $\varepsilon_r$  is given by equation 1 (LOEW et al., 2006):

$$\varepsilon_r = a + b\sigma_0 (dB) + c\sigma_0^2 (dB)$$
 eq. 1

The empirical equation incorporates different surface roughness conditions due to variations in land use expressed by the model parameters a, b and c. In order to focus on arable land after harvesting, the following model coefficients were used for this study (Table 1).

a	b	с
45.71	5.87	0.20

Tab. 1: Model Parameters for "harvested field" land use

With regard to the background of the algorithm which was originally developed for ERS data, the inversion model requires various adaptations for application on ENVISAT ASAR data, e.g. an incidence angle of approximately 23°. Thus, the incidence angles of the ASAR data and therewith the backscatter coefficients have to be normalised to a reference geometry. LOEW et al. (2006) propose a linear dependency of the backscatter coefficient of a given land type  $\sigma_L^0$  as a function of the incidence angle (equation 2). The parameters c and d are specific land use coefficients for the correction of the incidence angle  $\theta$ .

 $\hat{\sigma}_{L}^{0} = [c\theta + d] / 10000$  eq. 2

Using equation 2 with the reference incidence angle of  $23^{\circ}$ , the corrected backscatter coefficient of a given land use L is calculated as follows

$$\sigma_{\alpha}(L) = \sigma(\alpha) * \sigma(\theta)^{-1} * \sigma_{meas}$$
 eq. 3

where meas is the uncorrected backscatter coefficient.

#### 3.2.2 Conversion Dielectric Constant to Soil Moisture

The conversion from the real dielectric constant  $\varepsilon_r$  to volumetric soil moisture content  $m_v$  is done by the relationship established by TOPP et al. (1980) given in equation 4:

$$m_v = -5.3^{*}10^{-2} + 2.92^{*}10^{-2*}\varepsilon_r - 5.5^{*}10^{-4*} \varepsilon_r^{-2} + 4.3^{*}10^{-6*} \varepsilon_r^{-3}$$
 eq. 4

## 4 Results

The derived surface soil moisture distribution ranges from values below 18 vol.% up to 40 vol.% and greater. Examples of the established soil moisture maps are shown in the following figures both representing the same area but at different time. The spatial resolution of these maps corresponds to that of the geocoded ASAR image product. Very dark or bright pixels indicate areas where soil moisture information can not be obtained due to different land use (e.g. urban areas, forests).

Figure 1 is based on ASAR data shortly after a precipitation event. The surface soil moisture estimations are therefore relatively high. Most pixels representing the harvested agricultural land have values between 29.4 vol.% and 35 vol.%.

Figure 2 displays the model results from ASAR data taken during dry conditions. The statistic of the pixel distribution corresponding to the respective soil moisture values, mainly shows moisture contents of 23.8 - 29.4 vol.%.

## 5 Discussion

Concerning the precipitation data for the corresponding ASAR images, we assume that the calculated surface soil moisture patterns of the 16<sup>th</sup> of October, 2006 show on average higher volumetric soil moisture contents than 10 days later. Due to the pixel distribution within the given soil moisture classes, the maps differ both statistically and visibly from each other. The

estimated soil moisture distribution based on data directly after a raining event (figure 1) describes slightly higher surface humidity compared to the map resulting from data taken during a longer dry period (figure 2).



Figure 1: Soil Moisture Map of 2006-09-16 derived from ASAR data



Figure 1: Soil Moisture Map of 2006-09-26 derived from ASAR data

With regard to the accuracy of the surface soil moisture inversion scheme and according to LOEW et al. (2006), the validation of the modelled data with in-situ measurements resulted in a rms error of 4.0 vol.% for image mode data. So in general, the adaption of the soil moisture retrieval model was characterised by a trend of underestimation of the actual soil moisture dynamics explaining 40 - 54% of the observed soil moisture variance (LOEW et al., 2006).

## 6 Conclusion

Adapting the model of LOEW et al. (2006) on the ASAR data, showed acceptable correlations with the precipitation data of the test sites. Thus, the spatial soil moisture distribution maps for the agricultural study areas are a good approach for further investigation with regard to a quantification of the surface soil moisture content including in-situ measurements.

Concerning the numerous approximations and assumptions which have been made, an uncertainty analysis of error sources regarding the incidence normalisation and unknown or imprecise land use and soil texture information will be subject of further studies, too.

## 7 References

- BACH, H. & MAUSSER, W., 2003: Methods and examples for remote sensing data assimilation in land surface process modeling. IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41 (7): 1629-1637.
- CHOUDHURY, B. J., KERR, Y. H., NJOKU, E. G. & PAMPALONI, P., 1995: Passive microwave remote sensing land-atmosphere interactions. Proceedings of ESA/NASA International Workshop, France.
- HEILMANN, H., FISCHER, J., SYMMANGK, R., 1993: Geologie in Sachsen. Exkursionsführer. Die Böden des Osterzgebirges und seines nördlichen Vorlandes. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie/Bereich Boden und Geologie, Freiberg, E-1.
- HENNINGSEN, D. & KATZUNG, G., 2002: Einführung in die Geologie Deutschlands. Spektrum Verlag, 6th ed., ISBN 3-8274-1360-5.
- LOEW, A., LUDWIG, R. & MAUSSER, W., 2006: Derivation of Surface Soil Moisture From ENVISAT ASAR Wide Swath and Image Mode Data in Agricultural Areas. IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44 (4): 889-899.
- LU, Z. & MEYER, D. J., 2002: Study of high SAR backscattering caused by an increase of soil moisture over sparsely vegetated area: implications for characteristics of backscattering. International Journal of Remote Sensing, 23 (6): 1063-1074.
- ROMBACH, M. & MAUSSER, W., 1997: Multi-annual analysis of ERS surface soil moisture measurements of different land uses. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> ERS-Symposium: Space at the Service of the Environment, ESA-SP 414.
- SCHMUGGE, T. J., JACKSON, T. J. & MCKIM, H. L., 1980: Survey methods for soil moisture determination. Water Resources Research, 16: 961-979.
- TOPP, G. C., DAVIS, J. L. & ANNAN, A. P., 1980: Electromagnetic Determination of soil water content: Measurements in Coaxial Transmission Lines. Water Resources Research, 16 (3): 574-582.

# Anwendung von ADS40 Daten im Agrarbereich

### YVES BÜHLER<sup>1</sup>, MATHIAS KNEUBÜHLER<sup>1</sup>, STÉPHANE BOVET<sup>2</sup> & TOBIAS KELLENBERGER<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Der neue, digitale Luftbildsensor ADS40 von Leica Geosystems ist in der Lage, räumlich und radiometrisch höchstauflösende Daten aufzuzeichnen. Am Beispiel von Daten aus dem Testgebiet St. Urban im Kanton Luzern wird aufgezeigt, wie mit einer objektorientierten Methode eine Klassifikation lokaler Feldfrüchte erstellt werden kann. Das Testgebiet zeichnet sich durch eine grosse Vielfalt an Anbauflächen unterschiedlicher Grösse aus, was typisch für das Schweizer Mittelland ist. Es steht zudem ein zuverlässiger Referenz-Datensatz der Anbauflächen zur Verfügung, welcher am Befliegungstag erhoben worden ist. Diese Referenzdaten ermöglichen eine präzise Genauigkeitsabschätzung der Klassifikation. Für die gängigen Fernerkundungssoftware-Pakete stellt die Verarbeitung der grossen Datenmenge des ADS40 Scanners ein bedeutendes Memory-Problem dar. Es wird gezeigt, wie diesem Problem mit einem Klassifikationsansatz auf verschiedenen Auflösungsebenen begegnet werden kann. Die Stärke der hohen räumlichen Auflösung kommt auf der zweiten Auflösungsebene der Klassifikation zum Zuge, in der die einzelnen Feldtypen in Regionen mit unterschiedlicher Bewuchsdichte unterteilt werden können. Es werden Vorschläge gemacht, wozu diese Anwendung in Zukunft gewinnbringend eingesetzt werden könnte. Im zweiten Teil dieses Papers werden aus den ADS40 Daten verschiedene Vegetationsparameter abgeleitet und miteinander verglichen. Dabei zeigt sich, dass bereits einfache Parameter ohne zusätzliche Bodeninformation, wie der NDVI, aussagekräftige Resultate liefern. Durch simulierte Regressionsrechnungen wird aufgezeigt, wie aus dem NDVI mit Hilfe von Feldmessungen "Leaf Area Index" (LAI) Werte extrapoliert werden können. Dieser LAI-Index ist ein wichtiger Strukturparameter für die Quantifizierung von Phänologie, Biomasse und deren Energieumsatz, und wird häufig als Inputparameter für Ökosystemmodelle verwendet. Aufgrund der vorangehenden Klassifikation könnte diese Extrapolation dann auf das gesamte Untersuchungsgebiet angewendet werden.

## 1 Einleitung

Der Airborne Digital Sensor ADS40 der Firma Leica Geosystems ist in der Lage, räumlich und radiometrisch höchstauflösende Multispektraldaten aufzunehmen. Das Bundesamt für Landestopographie swisstopo hat im Jahr 2005 eine solchen Sensor beschafft. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Sensorparameter. In Zukunft sollen aus diesen qualitativ hoch stehenden Daten weitere Produkte abgeleitet werden. Um das Potential von ADS40 Daten für Anwendungen im Agrarbereich abzuschätzen. wurden im Rahmen einer Forschungskooperation von swisstopo mit den Remote Sensing Laboratories am Geographischen Institut der Universität Zürich erste Untersuchungen durchgeführt. Abbildung 1 zeigt die Konfiguration des Sensors mit der die vorliegende Untersuchung durchgeführt worden ist. Weiterführende Informationen zur ADS40 sind in (SANDAU 2005) zu finden.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Remote Sensing Laboratories RSL, Geographisches Institut Universität Zürich, Winterthurerstrasse 190 8057 Zürich. Email: yves.buehler@geo.uzh.ch

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> swisstopo, Bundesamt für Landestopographie, Seftigenstrasse 264 Postfach 3084 Wabern. Email: Stephane.Bovet@lt.admin.ch

Das Potential von Fernerkundungsdaten für Anwendungen im Agrarbereich ist bereits seit mehreren Jahren bekannt (MORAN et al. 1997, BARET et al. 2000). Die Sensoren und Methoden sind seither kontinuierlich weiterentwickelt worden (MORAN ET AL. 2003). Auch ADS40 Daten wurden bereits eingesetzt. So untersuchen (SHA et al. 2002) das Potential von ADS40 Daten für die Kartierung des Stickstoffgehaltes von Feldern, um daraus Düngereinsatz zu optimieren. Diese Arbeiten beziehen sich aber auf Gebiete mit sehr grossflächigen Feldern wie sie in der Schweiz kaum vorkommen.

CCD Zeilen (12'000 Pixel)	2 x Panchromatisch	465 – 680nm	
	blau	430 – 490nm	
	grün	535 – 585nm	
	rot	610 – 660nm	
	nir	833 – 887nm	
Pixelgrösse	6.5 x 6.5 µm		
Sichtfeld	64°		
Brennweite	62.77mm		
Stereo-Winkel	- 14.2°, 16° (14°, 16°, 18°), 28.4°		

Tab. 1: Sensorparameter der ADS40 (Quelle: Leica Geosystems 2006)



Abb. 1: Sensorkonfiguration der ADS40 von swisstopo (modifiziert nach Leica Geosystems 2006)

Das Testgebiet St. Urban in der Grenzregion der Kantone Luzern, Aargau und Bern, kann aufgrund der kleinräumigen Struktur der Felder und den angebauten Feldfrüchten als repräsentativ für landwirtschaftlich intensiv genutzte Gebiete im Schweizerischen Mittelland betrachtet werden. Diese Kleinräumigkeit erschwert aber die Analyse des Agrargebietes mit gängigen Fernerkundungsdaten und Methoden. Neuere Sensoren wie die ADS40 mit sehr hoher räumlicher und radiometrischer Auflösung eröffnen neue Anwendungsmöglichkeiten für diesen Bereich. Gleichzeitig führen diese Vorteile aber auch zu grossen Datenmengen. Die gängige Bildanalyse-Software stösst dabei an ihre Grenzen. Aus diesem Grund wird der Datensatz in dieser Untersuchung auf 1 Meter räumliche Auflösung skaliert. Durch die angepasste Gewichtung der einzelnen Pixel mit einer Sinus-Skalierungsfunktion wird das Verhalten des Sensors optimal simuliert. Die Vorwärtsblickrichtung des Falschfarbensensors (Abb. 1) verursacht geometriebedingten Verschiebungseffekte zwischen den Spektralkanälen bei nichtplanen Objekten. Durch die Skalierung der Daten werden diese Effekte verringert.

## 2 Objekt-orientierte Klassifikation der Agrarflächen

Die objektorientierte Analyse von Fernerkundungsdaten bietet gegenüber den pixelbasierten Methoden einige Vorteile, welche für Anwendungen im Agrarbereich genutzt werden können. Im ersten Schritt der Analyse werden Pixel mit ähnlichen Spektralwerten zu Objekten zusammengefasst wobei die Inputparameter (Grad der Homogenität, Anzahl und Gewichtung der Spektralkanäle, Formparameter) vom Benutzer bestimmt werden können. Die Klassifikation erfolgt danach auf Basis dieser Objekte und nicht mehr auf der Basis einzelner Pixel. Dieses Vorgehen entspricht eher der menschlichen Wahrnehmung und ermöglicht den Einbezug von deutlich mehr Informationen. So können innerhalb der Objekte statistische Werte wie der Mittelwert oder die Standardabweichung berechnet und in die Klassifikation mit einbezogen werden. Formparameter und Texturparameter erweitern die Möglichkeiten für die Klassifikation zusätzlich. Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Objekten können ebenfalls wichtige Zusatzinformationen liefern. Objekt-orientierte Klassifikationen haben in verschiedenen Untersuchungen zu deutlich besseren Resultaten geführt als pixel-basierte Ansätze (ECKERT & KNEUBÜHLER 2004). Eine detaillierte Übersicht über die Vorteile der objekt-orientierten Analyse gibt (BENZ et al. 2004).

## 2.1 Segmentierung

Ziel der Segmentierung ist es, die Untersuchungsobjekte möglichst optimal als einzelne Segmente zu repräsentieren. In diesem Projekt sind die Hauptuntersuchungsobjekte die einzelnen Felder. Die vier Spektralkanäle der ADS40 allein reichen nicht aus, um diese Felder sauber von den umgebenden Landschaftselementen abzugrenzen. Um die Basis für eine genaue Klassifikation zu legen, müssen deshalb weitere Informationen mit einbezogen werden. Verschiedene Tests haben gezeigt, dass vor allem Höheninformationen, abgeleitet aus dem ADS40 Oberflächenmodell und dem Laserscanner Höhenmodell der *swisstopo* (SWISSTOPO 2007), das Resultat wesentlich verbessern. Mit den Informationen über die Objekthöhen können vor allem Waldgebiete und Gebäude deutlich besser als einzelne Segmente ausgeschieden werden. Die Segmentierung wird in zwei unterschiedlichen Auflösungsstufen durchgeführt. Der räumlich schlechter aufgelöste Level mit grossen Segmenten dient in der nachfolgenden Klassifikation zur Abtrennung des Landwirtschaftsgebietes von Wald- und Siedlungsgebiet und als Grundlage für eine erste grobe Klassifikation der Feldtypen. Im zweiten, räumlich besser aufgelösten Level mit kleineren Segmenten wird die Klassifikation weiter verfeinert.

## 2.2 Klassifikation

Die landwirtschaftlich genutzte Fläche wird aufgrund der statistischen Werte der Spektralkanäle und dem NDVI in die fünf Klassen Acker, Fettwiese, Weide, Mais und Zuckerrüben unterteilt. Diese Klassen enthalten den Hauptanteil der vorhandenen Feldtypen und erlauben aufgrund der ausreichenden Menge an Bodenreferenzdaten eine fundierte Beurteilung des Resultates. Abbildung 2 zeigt das Ergebnis dieser Klassifikation. Wald- und Siedlungsgebiete sind dabei nicht klassiert worden da sie in dieser Arbeit nicht von Bedeutung sind.

Insbesondere bei der Unterscheidung von *Mais* und *Fettwiese* treten Probleme auf, da diese beiden Klassen in den vorhandenen Spektralkanälen sehr ähnliche Werte aufweisen. Die Klasse *Weide* beinhaltet zusätzlich auch andere Flächen mit vergleichsweise spärlicher Grasbedeckung wie Wiesen in Gärten oder Parks. Für die Unterscheidung weiterer Klassen sind zusätzliche Untersuchungen nötig. Allerdings begrenzt die spektrale Auflösung des Sensors mit vier Kanälen die Möglichkeiten in diesem Bereich. Zudem werden dazu ergänzende Bodenreferenzdaten mit zusätzlichen Feldtypen benötigt.



Abb. 2: Klassifikation des Landwirtschaftsgebietes im Untersuchungsgebiet St. Urban LU

Mit Hilfe des *NDVI*, einem Mass für die photosynthetische Aktivität von Pflanzen, können Rückschlüsse auf die Vitalität und die Dichte der Vegetationsdecke gezogen werden (PENG et al. 2003). Aufgrund der sehr hohen räumlichen Auflösung des ADS40 Sensors können die Felder in einem weiteren Schritt auf dem feineren Segmentierungslevel nach ihrer Vegetationsbedeckung

und dem Zustand der Vegetation weiter unterteilt werden. Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt der verfeinerten Klassifikation innerhalb der klassierten Felder.

Am Tag der Befliegung wurden im Testgebiet durch Feldbegehungen detaillierte Bodenreferenzdaten aufgenommen. Ungefähr die Hälfte dieser Bodenreferenzdaten wird in der vorliegenden Untersuchung zur Kalibrierung der Klassifikation verwendet. Die anderen 50% dienen zur Überprüfung der Klassifikationsgenauigkeit. Tabelle 2 zeigt die erreichten Genauigkeitswerte der fünf Klassen Acker, Fettwiese, Mais, Zuckerrüben und Weide.



Abb. 3: Verfeinerte Klassifikation innerhalb der klassierten Felder aufgrund des NDVI

Tab. 2	Genauigkeitsmasse für die	Nassiiikalio	n des Agrarg	jebieles	

	Acker	Fettwiese	Mais	Zuckerrüben	Weide
Producer Accuracy	0.95	0.90	0.75	0.90	0.55
User Accuracy	1.00	0.80	0.99	0.93	0.39
Kappa pro Klasse	0.91	0.87	0.70	0.88	0.51
Overall Accuracy	0.87				
Kappa Total	0.82				

Der hohe Kappa Index von 0,82 zeigt, dass die Klassifikation eine hohe Zuverlässigkeit aufweist. Die Klassen *Acker, Fettwiese* und *Zuckerrüben* weisen gar einen Kappa Wert von über 0,85 auf. Die Klasse *Mais* ist aufgrund der schwierigeren spektralen Abgrenzung gegenüber der Klasse *Fettwiese* etwas ungenauer klassiert worden. Die Klasse *Weide* beinhaltet auch zahlreiche Flächen in Gärten und Parks sowie Wegränder was zu einer deutlichen Verminderung der Genauigkeit führt. Die visuelle Bewertung des Resultates bestätigt die Aussagen der Genauigkeitsmasse.

## 3 Ableitung von Vegetationsparametern

Der Nahinfrarot- und Rotkanal des ADS40 Sensors ermöglichen die Ableitung verschiedener Vegetationsparameter. Ziel dieser Untersuchung ist es, zu überprüfen, ob aus den ADS40 Daten stabile und aussagekräftige Vegetationsindizes abgeleitet werden können. Tabelle 3 listet die untersuchten Indizes auf. Die Auswahl der Indizes beruht auf Erfahrungen aus vorangehenden Vegetationsuntersuchungen am RSL (VERRELST et al. 2006)

Index	Name	Formel	Inputinformationen	Referenz	
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	$\frac{(nir-red)}{(nir+red)}$	spektral	Rouse et al. 1973, LILLESAND & KIEFER 2000, PENG et al. 2003	
SR	Simple Ratio Vegetation Index	nir red	spektral	JORDAN 1969, PENG et al. 2003	
WDVI	Weighted Difference Vegetation Index	nir - a * red	spektral & Bodeninformationen	CLEVERS 1989, PENG et al. 2003	
PVI	Perpendicular Vegetation Index	$\frac{1}{\sqrt{(a^2+1)^*(WDVI-b)}}$	spektral & Bodeninformationen	BARET et al. 1991, BROGE & LEBLANC 2000	
SAVI2	Second soil adjusted Vegetation Index	$\frac{nir}{(red + \frac{b}{a})}$	spektral & Bodeninformationen	Major et al. 1990, Darvishzadeh et al. 2006, Broge & Leblanc 2000	
Spektralinformationen <i>nir</i> = Nahinfrarotkanal (ADS40)					
red = Rotkanal (ADS40)					
Bodeninfo	Bodeninformationen: a = slope of soil line (für diese Berechnungen 0,9)				
b = soil line intercept (für diese Berechnungen 0,1)					

Tab. 3: untersuchte Vegetationsparameter

Abbildung 4 zeigt das Verhalten obiger Indizes im Bezug auf den *NDVI*. Daraus wird ersichtlich, dass die Indizes stark korrelieren. Der einfach zu berechnende *SR* Index weicht nur geringfügig vom *SAVI2* Index und der *PVI* nur wenig vom *WDVI* ab. Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass für die untersuchten Feldtypen einfache Indizes wie zum Beispiel der *SR* oder der *NDVI* ohne Zusatzinformationen über die Bodenanteile bereits befriedigende Resultate liefern. Die aufwändigeren Indizes bringen für die untersuchten Anwendungen beinahe keinen Mehrwert. Einzig bei der Untersuchung der Klassen *Zuckerrüben* und *Mais* zeigen die Indizes *WDVI* und *PVI* ein leicht unterschiedliches Verhalten gegenüber dem *NDVI*. Bei Feldtypen, welche einen hohen sichtbaren Bodenanteil aufweisen können diese Indizes aber Mehrinformation liefern. Zum Beispiel könnten sie wahrscheinlich zur besseren Unterscheidung der Klassen *Zuckerrüben* und *Mais* verwendet werden.

Aus den oben beschriebenen Indizes können durch Korrelation der Daten mit Bodenmessungen Rückschlüsse auf den *Leaf Area Index LAI* gezogen werden. Dieser Index ist definiert als die totale einseitige Blattfläche im Verhältnis zur betrachteten Bodenfläche (CHEN & CHILAR 1995, VAN GARDINGEN et al. 1999, ZHANG et al. 2005). Der *LAI* ist ein wichtiger Strukturparameter für die Quantifizierung von Biomasse und deren Energieumsatz. Er wird in einer Vielzahl von Vegetationsuntersuchungen verwendet. Zusätzlich ist dieser Index ein wichtiger Inputparameter für diverse Ökosystemmodelle (HILL et al. 2006). Im Rahmen der Feldarbeiten im Gebiet St. Urban wurden nicht genügend *LAI*-Messungen in situ durchgeführt, um statistisch erhärtete Aussagen machen zu können. Das folgende Beispiel soll aber zeigen, wie für den Fall, dass eine grössere Anzahl Bodenreferenzdaten vorliegt, eine Extrapolation auf *LAI*-Werte der Feldtypen durchgeführt werden kann.



Abb. 4: Korrelation der verschiedenen Vegetationsindizes gegenüber dem NDVI (X-Achse)

Abbildung 5 zeigt die extrapolierten LAI-Werte für zwei Maisfelder. Aufgrund der ungenügenden Referenzdatenlage können diese Werte nicht als statistisch aussagekräftig bezeichnet werden. Im Vergleich mit dem Falschfarbenbild zeigt sich aber deutlich, dass in Regionen mit weniger Vegetationsbedeckung auch geringere LAI-Werte auftreten. Daraus kann geschlossen werden, dass die Resultate grundsätzlich sinnvoll sind. Diese Extrapolation kann auf alle Flächen ausgeweitet werden, welche in der Klassifikation als Mais ausgeschieden worden sind. Dadurch wird es möglich, Vegetationsprodukte für grössere Gebiete zu erstellen. Liegen verlässliche, quantitative Referenzmessungen für den LAI im Feld vor, so kann die Skala durch absolute LAI-Werte ergänzt werden.



Abb. 5: Extrapolierte LAI-Werte für zwei Maisfelder im Vergleich mit dem ADS40 Falschfarbenbild

## 4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Klassifikation des Landwirtschaftsgebietes im Raum St. Urban erreicht mit einem Kappa Index von 0,82 trotz der eingeschränkten spektralen Auflösung von vier Kanälen eine sehr hohe Genauigkeit. Allerdings bringt die hohe räumliche Auflösung der ADS40 Daten für diese erste Klassifikation keine wesentlichen Vorteile. Die anfallende Datenmenge überfordert das von der Bildanalysesoftware ansprechbare Memory. Aus diesem Grund wurden die Daten mit einer Sinc-Funktion auf einen Meter räumliche Auflösung skaliert. Die hohe Auflösung von 0.25 Metern ermöglicht aber eine verfeinerte Klassifikation der Feldtypen auf Basis des *Normalized Differenced Vegetation Index NDVI* auf einer feineren Segmentierungsstufe. So können verschiedene Photosynthese-Aktivitätsgrade innerhalb eines Feldes differenziert werden. Sogar Fahrspuren und kleinräumige Einflüsse auf die Vegetation können so detektiert und visualisiert werden (infield variability). Die aus den ADS40 Daten abgeleitete Kartierung des Landwirtschaftsgebietes erreicht eine hohe Qualität und könnte in der Schweiz für verschiedene Anwendungen grossflächig eingesetzt werden. Einige Beispiele für solche Anwendungen sind:

- Erkennung von Stressfaktoren wie Wassermangel und Pflanzenkrankheiten
- Basisinformationen für den Einsatz von Düngemitteln sowie Pestizide, Herbizide und Fungizide (*precision farming*)
- Präzise Ernteprognosen und Abschätzung des Reifestadiums
- · Rückschlüsse auf Bodenqualität und deren Veränderung
- Überwachung der deklarierten Anbauflächen im Bezug auf Agrarsubventionen

Allerdings sind dabei verschiedene Einschränkungen zu beachten. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die wichtigsten Vor- und Nachteile des Einsatzes von ADS40 Daten für die oben genannten Anwendungen.

Vorteile (+)	Nachteile (-)
Ermöglicht eine grossflächige Anwendung mit hoher Genauigkeit und sehr guter räumlicher Auflösung	Die riesigen Datenmengen sind heute noch ein grosses Problem für gängige Bildanalyse Software
Bei grossflächiger Anwendung billiger als andere Methoden	In der kleinräumigen Schweiz mit der sehr guten Datenlage nur bedingt sinnvoll (muss noch weiter abgeklärt werden)
Dank des Nahinfrarotkanals ist auch die Ableitung von verschiedenen Vegetationsparametern möglich	Die spektrale Auflösung reicht nicht, um alle Pflanzentypen einwandfrei zu klassieren
	Der Befliegungszeitpunkt muss optimal auf die phänologischen Phasen der Vegetation abgestimmt werden (evt. mehrere Befliegungen nötig)

Tab. 4: Wichtige Vor- und Nachteile der Anwendung von ADS40 Daten im Landwirtschaftsbereich

Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass mit genügend Bodenreferenzmessungen Extrapolationen des *Leaf Area Index* aus den *NDVI*-Werten erstellt werden können. In Verbindung mit Feldmessungen können so Fernerkundungsprodukte erzeugt werden, die Möglichkeiten für weitere Anwendungsgebiete eröffnen. Räumlich hochaufgelöste Biomassenabschätzungen für Ernteprognosen oder Untersuchungen über  $CO_2$  Bilanzen sind dafür Beispiele, welche in Zukunft eine wichtige Rolle spielen werden.

## 5 Literatur

- BARET, F., & GUYOT, G., 1991: Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. Remote Sensing of Environment, 35(2-3), pp. 161 173
- BARET, F., WEISS, M., TROUFLEAU, D., PREVOT, L., & COMBAL, B., 2000: Maximum information exploitation for canopy charcterization by remote sensing. Aspects of Applied Biology, 60, 71-82
- BENZ, U., HOFMANN, P., WILLHAUCK, G., LINGENFELDER, I. & HEYNEN, M., 2004: Multiresolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing volume 58, pp. 239 – 258, 2004
- BROGE, N. H. & LEBLANC, E., 2000: Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. Remote Sensing of Environment, 76(2), pp. 156 – 172
- CHEN, J. M. & CHILAR J. 1995: Quantifying the effect of canopy architecture on optical measurement of leaf-area index using 2 gap size analysis methods. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 33(3), pp. 777 787
- CLEVERS, J. 1989: The application of weighted infrared-red-vegetation index for estimating leaf area index by correcting for soil moisture. Remote Sensing of Environment, 29, pp. 25 - 37
- DARVISHZADEH, R., ATZBERGER, C.G. & SKIDMORE, A.K., 2006: Hyperspectral vegetation indices for estimation of leaf area index. In: ISPRS 2006 : ISPRS mid-term symposium 2006 remote sensing : from pixels to processes, 8-11 May 2006, Enschede, the Netherlands. Enschede : ITC, 2006. 6 p.

- ECKERT, S. & KNEUBÜHLER, M., 2004: Application of Hyperion Data to Agricultural Land Classification and Vegetation Properties Estimation in Switzerland, Proc. XXth Congress ISPRS, July 12-23, 2004, Istanbul, pp: 866-872.
- HILL, M. J., SENARATH, U., LEE, A., ZEPPEL, M., NIGHTINGALE, J. M., WILLIAMS, R. J. & MCVICAR, T. R. 2006: Assessment of the MODIS LAI product for Australian ecosystems. Remote Sensing of Environment, 101(4), pp. 495 – 518
- JORDAN, C. F. 1969: Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. Ecology, vol. 50, pp. 663–666
- LEICA GEOSYSTEMS 2006: www.leica-geosystems.com (access 17. April 2007)
- LILLESAND, T. M., & KIEFER, R. W. 2000: Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley & Sons, Inc, New York
- MAJOR, D.J., F. BARET UND G. GUYOT, 1990: A ratio vegetation index adjusted for soil brightness. International journal of remote sensing, Vol. 11, Nr. 5, S. 727-740
- MORAN, M.S., INOUE, Y., & BARNES, E.M., 1997:. Opportunities and limitations for imagebased remote sensing in precision crop management. Remote Sensing of Environment, 61, 319-346
- MORAN, S., FITZGERALD, G., RANGO, A., WALTHALL, C., BARNES, E., BAUSCH, W., CLARKE, T., DAUGHTRY, C., EVERITT, J., ESCOBAR, D., HATFIELD, J., HAVSTAD, K., JACKSON, T., KITCHEN, N., KUSTAS, W., MCGUIRE, M., PINTER, P., SUDDUTH, K., SCHEPERS, J., SCHMUGGE, T., STARKS, P., & UPCHURCH, D., 2003: Sensor development and radiometric correction for agricultural applications. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 69, 705-718
- PENG, G., RUILIANG, P., BIGING, G. S. & LARRIEU, M. R., 2003: Estimation of forest leaf area index using vegetation indices derived from Hyperion hyperspectral data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41(6), pp. 1255 – 1362
- ROUSE, J.W., R.H. HAAS, J.A. SCHELL & D.W. DEERING, 1973: Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: third ERTS Symposium, NASA SP-351, NASA, Washington, DC, Vol. 1, Nr., S. 309-317
- SANDAU, R., 2005: Digitale Luftbildkamera, Einführung und Grundlagen, Wichmann Verlag, Heidelberg
- SHA, B. P., SUHAMA Y., SUHAMA T., SHIBUSAWA, S., HACHE, C. & KATO 2002: Mapping plant nitrogen status by using ADS40 to aid precision farming. Proceedings of the Asian Conference on Remote Sensing ACRS 2002, Kathmandu, Nepal
- SWISSTOPO 2007: Höhenmodelle DOM & DTM-AV, http://www.swisstopo.ch:80/de/products/digital/height/dom\_dtmAV (access 23. April 2007)
- VAN GARDINGEN, P. R. et al. 1999: Leaf area index estimates obtained for clumped canopies using hemispherical photography. Agricultural and Forest Meteorology, 94(3-4), pp. 243
- VERRELST, J., KOETZ, B., KNEUBÜHLER, M. & SCHAEPMAN, M., 2006: Directional Sensitivity Analysis of Vegetation Indices from Multiangular CHRIS/PROBA Data, Proc. ISPRS Comm. VII Midterm Symposium, 8-11 May 2006, Enschede (NL), CD-ROM.
- ZHANG, Y., CHEN, J., & MILLER, J. 2005: Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. Agricultural and Forest Meteorology , 133(1-4), pp. 166

# Satellite based monitoring of the national forest resources in the pacific island state of Vanuatu

## M. HEROLD<sup>1</sup>, J. SAMBALE<sup>1</sup>, M. LINDNER<sup>1</sup>, M. URBAN<sup>1</sup> & S. WEAVER<sup>2</sup>

Summary: Deforestation of tropical forests contributes with a significant amount to the global greenhouse gas emissions. In this regard, international discussions are currently underway within the UNFCCC to build incentives for developing countries to protect their national forest resources and thereby reduce or avoid deforestation and the resulting carbon emissions. To assist this policy development process, a number of related case studies are ongoing to test different carbon credit approaches. This paper summarizes the outcomes of a study that is part of the Vanuatu Carbon Credits Project. The remote sensing component of that project aimed to develop a historical deforestation database for the pacific island state Vanuatu based on historical satellite observations. The analysis was based on Landsat, ASTER and SPOT imagery for the time steps 1990 and 2000. Image classification and change detection was applied to map in a wall-to-wall approach the forest cover for the year 2000, to assess the forest changes for the period from 1990 to 2000 and to derive the historical deforestation rates for the individual islands. The observed deforestation rate in Vanuatu is comparatively low, but the proven technical approach could be directly transferred to other national circumstances in the south pacific region and beyond.

#### 1 Background and objectives

Deforestation accounts for 20 % - 25 % of global greenhouse gas emissions, making it the most significant source of emissions in developing countries. If these emissions are not reduced, they have the potential to undercut reductions in industrial and energy emissions. Deforestation also has significant negative impacts on soil quality, biodiversity, local livelihoods and indigenous communities. Despite the negatives impacts of deforestation, creating incentives to mitigate this source of emissions from developing countries has not been adequately addressed in either the UN Convention on Climate Change (UNFCCC) or the Kyoto Protocol. International negotiations are currently underway within the UNFCCC to build incentives for developing countries to reduce or avoid emissions from deforestation and forest degradation (REDD). These negotiations were initiated at COP-11 in 2005 by the Governments of PNG and Costa Rica, and the Coalition of Rainforest Nations (of which Vanuatu is a member). In that context, the Vanuatu Carbon Credits Project (http://www.vuw.ac.nz/geo/research/climate-change/vanuatu-forests/index.html) was designed to build capacity in Vanuatu to utilize carbon markets to help fund REDD and associated sustainable development activities. In order to model and test a national mechanism for the use of carbon finance for REDD, it is necessary to undertake a detailed national forest cover area change assessment. This was done through a remote sensing analysis those results are presented in this paper. The key objective was to build a historical deforestation database for Vanuatu including forest cover and deforestation maps and associated area estimates for two

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Friedrich-Schiller-University Jena, Germany

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Victoria University, Wellington, New Zealand

time steps: 1989/90 and 2000-2003, using primarily LANDSAT TM and ETM. In addition, this project directly contributes to the international process to coordinate and synthesize the experiences for different case studies ongoing in different parts of the world (i.e. Bolivia, Cameroon, SE-Asia, PNG). Hence, the results contribute to strategic planning for sustainable development both nationally (in Vanuatu) and internationally (through lessons/models that can be applied to other forested nations). This project was funded by the British High Commission in New Zealand and lead by the Victoria University of Wellington.

## 2 Study area

The Republic of Vanuatu is an island nation located in the South Pacific Ocean, approx. 1.750 km east of Australia and 500 km north-east of New Caledonia. It consists of a north-south oriented chain of 13 principal islands and about 67 smaller islands with a total area size of 12.190 km<sup>2</sup> and a north-south extension of about 650 km (Figure 1).



Figure 1: Map of Vanuatu (data source: VANRIS, BELLAMY 1993)

The islands of the archipelago are mostly of volcanic origin and mountainous. Some volcanoes are still active. The capital of Vanuatu is Port-Vila located on the island of Efaté. The population is about 209.000 inhabitants which are predominantly Melanesians, with some Polynesians; but also Chinese settlers and Vietnamese laborers. The economy is based mainly on agriculture, cattle raising, and fishing, but also with an increasing tourism sector. Vanuatu has comparatively low rate of historical deforestation.

## 3 Satellite and ancillary data

The study integrated a number of satellite data following the observation model of GOFC-GOLD (DE FRIES et al. 2006) for monitoring tropical deforestation using primarily historical LANDSAT TM and ETM data for high-resolution change monitoring. Coverage for Vanuatu was available for the periods 1989/90 and 2000-2003 with some cloudy areas remaining. Additional data from the European SPOT sensor (1990) and ASTER (2000) have been acquired to increase the spatial cloud free coverage and enhance the forest mapping capabilities through multiple observations. For covering 1990, this project used 17 Landsat TM scenes and 16 SPOT scenes. To cover the 2000 time frame 14 Landsat ETM and 14 ASTER scenes were used. The temporal coverage of the satellite observations vary up to 2 or 3 years difference from the 1990 and 2000 dates. These temporal differences were considered in the deforestation rate analysis.

To complete the data set for the project additional data sources have been used. The Vanuatu Resource Information System (VANRIS GIS, BELLAMY 1993) was provided by the Vanuatu Forestry Department and yields spatial information on vegetation type (from 1984 air photo interpretations), land use intensity and type of land use. The use of these vector data was useful but limited due to geolocation shifts observed for some islands, resulting from different original cartographic data sources used during the developing process. For consistent coastline we applied the SRTM water bodies product available for free (http://www2.jpl.nasa.gov/srtm-/cbanddataproducts.html). Available high resolution Qickbird images on Google Earth provided an additional reference information source for visual interpretation.

## 4 Methodology

#### 4.1 Satellite data pre-processing

The analysis of deforestation dynamics in this specific area needs to be based on high-quality and comparable satellite data. Such data can be provided by a comprehensive pre-processing including georeferencing and co-registration, mosaicing, masking and radiometric normalization of available satellite data (Figure 2).



Figure 2: Workflow for the satellite imagery preprocessing

The rectification was performed to a unique geodetic system (Geographic Lat/Long, ellipsoid and datum WGS84). The 2000 Landsat Geocover dataset provided the spatial reference for image-to-image registration of the other satellite data. A transformation was done for each scene,

whereas ground control points (GCP) were set visually with regard to the quality of the scene and the percentage of land coverage. Using a polynomial second order transformation and a nearest neighbor resampling, mean RMS errors less than one pixel resolution were achieved for each of the respective scene. After geo-referencing all data were processed to image mosaics. Landsat bands 4 and 5 thresholds (tuned for different regions) have been applied to exclude water bodies and cloud shadows. A Landsat band 1 threshold value was used to detect clouds. This approach worked well for thick clouds. Thin clouds and haze were either excluded through manual editing or kept for the analysis. In particular the spectral bands with longer wavelength penetrate thin clouds and haze and can be used for the interpretations. Standard multi-temporal image normalization through histogram matching was performed to reduce radiometric image differences.

#### 4.2 Forest mapping and change assessment

The mapping and data analysis process contains two individual work items. The forest mapping for the year 2000 provides the baseline data for existing forest and tree cover for Vanuatu. The change mapping 1990-2000 is a different process and employs change detection methods to identify areas of forest cover change. In the final step, both products can be combined to derive a historical forest map for 1990. In general, both mapping items were done on an island by island basis to accommodate the heterogeneity of input data and tune the supervised analysis to the specific circumstances of the major island groups.

#### 4.2.1 Deriving the forest cover map

The approach to derive the forest cover map is to classify pseudo spectral channels and label the spectral classes using the reference data into three categories defined by the amount of tree canopy cover (Figure 3).



Figure 3: Workflow to derive the forest cover map for the year 2000

The use of pseudo spectral channels is required to reduce effects of different illumination conditions due to topography. It is known that image ratios and principal component analysis reduce such topographic effects while maintaining the majority of image information. The first ratio is the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) that is defined as the difference

between the near-infrared (NIR) and the red radiation reflected by the surface, normalized by the sum of both ([NIR-RED]/[NIR+RED] TUCKER, 1979). The Normalized Difference Water Index (NDWI) works in a similar manner using the NIR and short-wave infrared band (SWIR, GAO 1996). In addition, the principal component analysis reflects the general surface illumination pattern (including topographic variations) in the first component. The subsequent principal components 2-4 have been used for the image classification. The minimum mapping unit applied is three Landsat pixels of 900 km<sup>2</sup> each. Thus, the Minimum mapping Unit can be estimated with about 0.3 ha.

#### 4.2.2 Forest change detection

The forest change detection aimed to identify areas of significant loss in tree canopy cover and thus areas of deforestation. The technical approach is illustrated in Figure 4. The input data are the Landsat TM and SPOT data for 1990 and the Landsat ETM and ASTER data for 2000. With two datasets available for each of the two time steps, there is a maximum of four change observations for each location if all datasets are available.



Figure 4: Workflow for the forest cover change detection

To derive information on what datasets are available for which location a common cloud mask was developed. The loss of tree canopy cover is highlighted in several spectral indicators including the NDVI, NDWI, the red spectra channel and the SWIR. Each of those bands where derived for the image data. To highlight the change a principal component analysis is performed between the associated change pairs, i.e. NDVI'90 and NDVI'00, NDWI'90 and NDWI'00 etc. The first principal component contains the information that both have in common (i.e. similar NDVI for 1990 and 2000). The second principal component highlights the areas where things have changed between the dates. This second principal component for changes in the NDVI, NDWI, the red band and the SWIR band are then jointly classified using an unsupervised clustering. The classification contains classes of potential forest loss. There maybe other influences that may be manifested in the potential change classes (i.e. phenology, radiometric
image distortions and other artifacts like cloud boundaries). Thus, all identified potential change locations are visually inspected whether they indeed reflect deforestation. All change areas including one pixel change areas (~900 km<sup>2</sup>) have been considered in the final map product.

#### 4.3 Deriving deforestation rates

The rate of deforestation reflects the area of forest loss within a particular period, usually per year. The frame for this study was an assessment of deforestation between 1990 and 2000 for the whole of Vanuatu. The calculation of the deforestation rate includes an average annual rate for a 10 year period. As reference period we applied 1<sup>st</sup> July 1990 to 1<sup>st</sup> July 2000 (a total of 3.653 days). The original satellite change observations had to be adjusted according to this time period since the observation dates are varying from the reference dates. In addition, there are areas of persistent clouds where no change observations could be performed. To accommodate these two factors, reference period adjustment and no data adjustment, we used a linear interpolation approach, i.e. if the mapping period was 5 % longer than the reference period we assumed 95 % of the mapped deforestation happened in the reference period. A similar approach is used for the no data adjustment with the same relative amount of deforestation being assumed in the no data region of the same island.

## 5 Results

#### 5.1 Forest cover

The derived forest cover map for Vanuatu contains three land cover categories based on tree canopy cover density using the thresholds defined by the UN Land Cover Classification System (LCCS, DIGREGORIO 2005). The lower threshold of 15 % tree cover has to be understood as a range of 10-15 %. Basically the areas in the classes 15-40 % and 40-100 % tree cover would constitute a forest cover as defined by FAO (if land use is not considered). The overall distribution of the forest cover classes derived for Vanuatu is shown in table 1 and emphasizes the dominance of areas with tree cover larger than 40 %. Following the pure "land cover" perspective taken in this study, the area of land with more than 10-15 % tree canopy cover is more than 1 million ha. It needs to be considered that these values may not be directly comparable with other existing estimates.

	Total Area according to Vanuatu VANRIS data [ha]	Area >40% tree canopy cover [ha]	Area 40-15% tree canopy cover [ha]	Area >15% tree canopy cover [ha]
Total	1.224.304	981.785,5	193.227,2	4.9291,3
Total %	100	80,2	15,8	4,0

Tab. 1: Overview of the satellite imagery used in the project

#### 5.2 Deforestation change

Deforestation maps have been produced for all islands. The analysis of forest change revealed a variety of change pattern for different parts of Vanuatu. One type is characterized by large scale removal of forests in managed land areas with parts of the cleared land being converted to

agriculture. A second type comprises areas of forest clearing and logging in former undisturbed forest areas. The construction of new roads in these areas improved accessibility and can drive forest loss due to logging and building construction. A third case occurs mainly on the smaller, inaccessible island. In these regions no transportation infrastructure is visible in the imagery and the loss of forest is due small-scale changes in agriculture and plantation. One essential consideration during the change detection was to deal with data availability. Although data from a number of satellites have been used there are still remaining areas of persistent cloud cover. Such areas with no information from either 1990 or 2000 available were excluded from the change mapping process. About 80 % of the Vanuatu land area could be included in the change detection. Nearly 55 % of the land area is covered by 2 or more change observations. Basically, the more change observations are available the more confidence there is in the observed change.



Figure 5: Forest loss in Vanuatu in the period from 1990-2000

The rates of deforestation were calculated from the satellite observed forest area change adjusted to accommodate the reference time period  $(1^{st}$  July 1990 to  $1^{st}$  July 2000) and the areas with no data. The gross deforestation for all islands of Vanuatu between 1990 and 2000 is estimated with 4.677,6 ha or 467,8 ha/a. More than 1/5 of the total forest loss was observed on the island of Santo, the largest of the archipelago. The spatial distribution of the forest loss per island in figure 5 emphasizes Santo and Tanna as the Vanuatu areas with most gross deforestation.

## 6 Conclusions

The presented project aimed to provide a historical deforestation database using historical satellite observations. Applying such an approach to Vanuatu requires consideration of particular challenges. There are no major previous satellite based land cover or forest monitoring studies. Continuous optical satellite observations are challenged by persistent cloud cover. For remote island only limited satellite coverage is available. Furthermore, the topography of the volcanic islands complicates the image interpretation and mapping process. Despite such difficulties, the project results have proven the suitability of satellite-based assessment of forest cover change in the context of REDD.

The results have shown that an area of more than 4600 ha has been deforested. In an international context, such a rate of forest loss is comparatively low but there are distinctly different patterns for the different parts of Vanuatu. The different processes relate to industrial logging, changes in plantations and agricultural pattern, and subsistence timber extraction. Developments of policies and carbon crediting options have to consider these different processes at work.

The development of the Vanuatu deforestation database provides the first and essential step to further evolve the basis for Vanuatu's participation in any REDD carbon crediting system. There are a number of next steps to have to be pursued to further progress in this arena. An extended remote sensing survey 2006 to develop the Vanuatu historical deforestation is envisaged. A detailed study of the identified deforestation hot spots could help to further understand the processes and future threats for the loss of forest. The project results have proven the suitability of satellite-based assessment of forest cover change in the context of REDD. The technical approach used and proven in this Vanuatu case study could be directly transferred to other national circumstances in the south pacific region and beyond. Since major deforestation problems tend to be of international origin and involve regional impacts, the project will certainly aim to extend beyond the boundaries of Vanuatu.

## 7 Literature

- BELLAMY, J. A., 1993. Vanuatu Resource Information System (VANRIS) Handbook. Brisbane, CSIRO & Qld. Dept. of Primary Industries.
- DEFRIES, R., ACHARD, F., BROWN, S., HEROLD, M., MURDIYARSO, D., SCHLAMADINGER, B. & DE SOUZA, C., 2006. Reducing greenhouse gas emissions from deforestation in developing countries: considerations for monitoring and measuring, Global Terrestrial Observing System of the United Nations (GTOS) report 46, www.fao.org/gtos/pubs.html.
- DIGREGORIO, A., 2005. UN Land Cover Classification System (LCCS) classification concepts and user manual for Software version 2. Available online at: www.glcn-lccs.org.
- GAO, B.-C., 1996. NDWI-A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. Remote Sens. Environ., 58: 257-266.
- TUCKER, C., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, 8: 127-150.

# Einsatz von Mikro- und Minidrohnen für Fernerkundungsaufgaben in der agrochemischen Forschung und Entwicklung

# ADRIAN ANNEN<sup>1</sup>, STEPHAN NEBIKER<sup>2</sup> & DAVID OESCH<sup>3</sup>

Zusammenfassung: Die agrochemische Feldforschung weist Eigenheiten auf, welche hohe Anforderungen an den Einsatz von Fernerkundungsmethoden mit sich bringen. So werden auf einem Testgelände oft unterschiedliche Kulturen in relativ kleinen Feldflächen angebaut, die wiederum in sehr kleine Testplots mit Flächen von nur einem bis wenigen Quadratmetern unterteilt sind. Zudem werden je nach Kulturart hohe Wiederholraten in der Bonitierung angestrebt. Mit dem Einsatz neuer autonomer Mikrooder Minidrohnen und geeigneter multispektraler Bildsensoren könnten diese speziellen Anforderungen zukünftig effizient und kostengünstig befriedigt werden. In dieser Publikation werden die Erfolg versprechenden Ergebnisse erster Feldversuche mit einem GPS gestützten Modellhelikopter vorgestellt, die vom Institut Vermessung und Geoinformation (IVGI) der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) in Zusammenarbeit mit der Syngenta Crop Protection AG durchgeführt wurden.

## 1 Einleitung

In der agrochemischen Forschung werden neue Wirkstoffe und Produkte wie Herbizide, Pestizide, Fungizide und Düngemittel auch in Feldversuchen untersucht. Heute werden diese Feldversuche episodisch (Vegetationszeit) in periodischen (wöchentlichen) Abständen durch erfahrene Mitarbeiter mit beträchtlichem Arbeitsaufwand visuell anhand der Blattflächeneigenschaften erfasst (bonitiert). Bei dieser gualitativen Methode werden in den meisten Fällen Anzahl, Grösse und Zustand der Pflanzenblätter beurteilt. Dabei sind Forscher stets auf der Suche nach neuen Verfahren, um die Beurteilung der Feldversuche möglichst zuverlässig und ökonomisch vorzunehmen. Grossflächige Abschätzungen des Chlorophyllgehaltes (grüne Blattfläche) eines Bildausschnittes haben eine lange Tradition in der Satellitenfernerkundung [TUCKER 1979]. Für Feldversuche mit Testplots in einer typischen Grösse von einem bis wenigen Quadratmetern reicht jedoch die verfügbare räumliche Auflösung satellitengestützter Systeme nicht aus. Ausserdem ist deren Verfügbarkeit für die Versuchflächen oft ungenügend. Zudem beeinflusst die grosse Distanz zwischen Sensor und Zielfläche das auszuwertende Signal (Atmosphäre / Geometrie). Als mögliche wirtschaftlichere Lösung, da kostengünstiger und flexibler, bieten sich tief fliegende, autonome Plattformen wie Mini- oder Mikrodrohnen an. Solche Systeme ermöglichen eine hohe räumliche Auflösung im Subdezimeterbereich, können nach Bedarf in Betrieb genommen werden und garantierten somit einen planbaren und regelmässigen Einsatz.

Das Institut Vermessung und Geoinformation (IVGI) der Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) setzt im Fachbereich Photogrammetrie und Fernerkundung seit ca. 2 Jahren Modellhubschrauber bzw. Mini- und Mikrodrohnen ein. Im Vordergrund standen dabei Untersuchungen zur digitalen 3D-Rekonstruktion von Kulturdenkmälern und Forschungsarbeiten im Bereich der Echtzeit-Georeferenzierung

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Adrian Annen: Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Vermessung und Geoinformation

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Prof. Dr. Stephan Nebiker: Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Vermessung und Geoinformation

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Dr. David Oesch: Syngenta Crop Protection AG, Agronomic Information Services

mobil erfasster Videodaten [EUGSTER 2007]. Diese Erfahrungen wollte das IVGI in den Bereich des Vitalitäts-Monitorings in der Agrochemie einbringen.

Im Rahmen einer Zusammenarbeit mit der Firma Syngenta Crop Protection AG sollte eine kostengünstige und flexibel einsetzbare Lösung für die Beurteilung von kleinräumigen Testfeldern mittels Fernerkundung untersucht werden. Die objektive und reproduzierbare Erfassung und Beurteilung der Testfelder mit Hilfe von Drohnen basierten Multispektralaufnahmen sollten in einem Pilotversuch getestet und evaluiert werden.

# 2 Datenerfassung

Im Rahmen des nachfolgend beschriebenen Pilotversuches sollten die Möglichkeiten der Anwendung von Fernerkundungsmethoden auf von Mikrodrohnen erfassten sehr hochaufgelösten Luftbildern (Pixelgrössen im Subdezimeterbereich) bei der Beurteilung von Versuchsflächen im Syngenta Testareal in Stein (AG) am Beispiel einer Rebkultur getestet werden. Weiter sollten Untersuchungen zur geometrischen und radiometrischen Genauigkeit im Rahmen einer Diplomarbeit [BROSI 2006] durchgeführt werden. Die Initialisierung dieses Projektes erfolgte zu Beginn des Sommers 2006. Bereits Mitte August 2006 konnten die zwei Testflüge durchgeführt werden.

## 2.1 Testareal Stein (AG)

Das Testareal der Syngenta befindet sich in der Region Nordwestschweiz im Kanton Aargau (AG) in unmittelbarer Nähe zur Landesgrenze nach Deutschland. Im Versuchsareal werden Applikationen in Feldversuchen an unterschiedlichen Kulturen (u.a. Kartoffeln, Reben, und Obstkulturen) getestet. Für den Pilotversuch wurde eine Rebkultur, bestehend aus zehn Reihen ausgewählt, welche wiederum in je 2.5m lange Testplots bzw. -parzellen unterteilt waren (siehe Abbildung 1 links). Insgesamt waren somit 240 Testparzellen vorhanden.



Abbildung 1: Testplots Reben (links: Ansicht von oben, rechts: Schrägansicht) mit 10 Reihen à je 24 Testparzellen

Zeitgleich zur Befliegung wurde eine Bonitierung des Vegetationszustandes aller Testplots durch Fachleute der Syngenta durchgeführt. Dabei beurteilen zwei Forscher die Prozentzahl kranker Blätter pro Testplot. Diese Bonitierungsresultate dienten als Referenzdaten für die anschliessenden Auswertungen und Untersuchungen.

#### 2.2 Bildaufnahme

Da die Untersuchung des Gesundheitszustandes der Rebkulturen nur in der Vegetationsphase bis maximal Ende August Sinn machte, mussten in geringer Zeit geeignete Bildsensoren evaluiert und ein erster Bildflug durchgeführt werden. Nachfolgend sind die wichtigsten Aspekte zur Datenerfassung aufgeführt.

#### 2.2.1 Sensorplattform

Das Projekt wurde mit einem Modellhubschrauber der Firma weControl AG, Zürich geflogen. Das Fluggerät besitzt einen Rotordurchmesser von 1.8m, ist mit einem Verbrennungsmotor ausgestattet und hat eine Nutzlast für die eigentlichen Bildsensoren von ca. einem Kilogramm. Dieser Modellhubschrauber ist mit dem Fluglageregelungssystem wePilot1000 ausgestattet, welches sowohl ein einfaches Fliegen per Joystick als auch eine vollautomatische Waypoint-Navigation nach GPS-Koordinaten ermöglicht. Die GPS-Koordinaten werden mit einer Genauigkeit von ca. 3m abgeflogen. Zusätzlich wird ein Videosignal zur Überprüfung des Bildausschnittes über einen digitalen Datenlink zur Bodenstation übertragen.

#### 2.2.2 Bildsensoren

Eine erste Evaluation ergab, dass kein Multispektralsensor mit einem Gewicht unter 3kg (inkl. Stromversorgung und Speichereinheit) existierte. Deshalb mussten eigene Kameraköpfe, Objektive, Speichereinheiten und Filter beschafft werden. Die daraufhin ausgewählte Kamera Sony SmartCam erfüllte die Anforderungen an Gewicht und CCD-Empfindlichkeit im nahen Infrarot – bei moderaten Anschaffungskosten – am besten.

Im Wesentlichen besitzt die für die NIR-Aufnahmen eingesetzte Kamera folgende technischen Eigenschaften:

- Chip: 1/2" 1280x1024 CCD (monochrom)
- Steuereinheit: integrierter 400 MHz CPU mit 256 MB DDR-SDRAM
- Speicher: bis zu 4 GB Compact Flash
- Gewicht: 400g (ohne Optik und Stromversorgung)
- Optik: Präzisionsobjektiv von Schneider Kreuznach, korrigiert von 400 bis 1000 nm
- Filter: Hochpassfilter mit Cut-on Wellenlänge von 780 nm (bis ca. 1000 nm)

Um die Aufnahmen im sichtbaren und vor allem im roten Spektralbereich zu erfassen, wurde eine handelsübliche digitale Spiegelreflexkamera eingesetzt. Die Kamera für die RGB-Aufnahmen hatte folgende technischen Eigenschaften:

- Kameratyp: Canon EOS 20D
- Chipgrösse: 22.5 x 15.0 mm (CMOS), 3504 x 2336 Pixel
- Gewicht: 770 g
- radiometrische Auflösung (RAW-Format): 12 bit
- Optik: Standardobjektiv mit Festbrennweite und IR-Blocker (Cut-off ca. 720 nm)

Mit dem RAW-Format konnten die vom Sensor erfassten Grauwerte ausgelesen und verarbeitet werden. Für den Rotkanal wurden nur die effektiv erfassten Pixel (Stichwort: Bayer-Muster) mit einer Software aus der Astronomie-Photographie extrahiert. Somit konnte gewährleistet werden, dass keine kamerainterne Interpolation der Messwerte vorgenommen wurde. Allerdings lag somit die nutzbare Auflösung der Kamera für den Rotkanal nur noch bei 1752x1168 Pixel.

#### 2.2.3 Flugplanung und -aufnahmen

Auf Grund der geringen Nutzlast (ca. 1 kg) und der verfügbaren Sensoren mussten die Flüge für den sichtbaren und den NIR-Spektralbereich getrennt durchgeführt werden. Die daraus entstehenden Anforderungen an eine präzise Koregistrierung der einzelnen Kanäle sind in [BROSI 2006] erläutert.

Zur Vorbereitung der Aufnahmen wurde eine photogrammetrische Flugplanung durchgeführt. Dabei wurde angestrebt, über eine geeignete Objektivwahl mit beiden Kameras sowohl eine identische Pixelgrösse bzw. Ground Sampling Distance (GSD) als auch eine annähernd identische Flughöhe zu erreichen. Geplant wurde je ein Streifen über dem Rebenfeld mit 60% Längsüberdeckung, was für jeden Flug 4 Bilder ergab (siehe Abbildung 2 links). Dieser Streifen wurde jeweils mit einer Flughöhe von 110 Metern über Grund geflogen. Daraus resultierten ein Bildmassstab von ca. 1:11'000 (RGB-Kamera, nur rote Pixel) bzw. von ca. 1:13'750 (NIR-Kamera) und eine durchschnittliche GSD von 7 cm (für beide Bildblöcke). Um eine präzise Georeferenzierung der Bilddaten zu ermöglichen, wurden 5 Passpunktmarken ausgelegt und mittels RTK-DGPS mit einer Genauigkeit von ca. 2 cm in der Lage und ca. 3 cm in der Höhe eingemessen.



Abbildung 2: Links: Flugplanung mit dem durch die Bilder abgedeckten Bereich (grau) und den eingezeichneten Passpunkten (rechts: vergrösserte Passpunktmarke)

Die Flugplanung konnte vor dem Bildflug direkt an der Bodenstation des Modellhubschraubers eingelesen und entsprechend ausgeführt werden. Die Bilder wurden anhand der Flugplanung von der Fluglageregelung automatisch über ein Trigger-Signal ausgelöst. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass die Aufnahmezentren bei beiden Flügen innerhalb einer Genauigkeit von ca. 3 m übereinstimmten.

# 3 Auswertung

## 3.1 Vegetationsindizes

Vegetationsindizes machen sich die Tatsache zunutze, dass die in den Blättern enthaltenden Pigmente von gesunder Vegetation einfallende (Sonnen-)Strahlung in ganz besonderer Weise reflektieren. Während gesunde, junge Vegetation nämlich vom sichtbaren Licht nur relativ wenig reflektiert, ist die Reflektion im daran anschliessenden nahen Infrarot (NIR) deutlich höher. Dieser Anstieg ist umso stärker, je gesunder, jünger und dichter die Vegetation ist. Dieser charakteristische Unterschied zwischen sichtbarem Licht und nahem Infrarot ist bei den meisten anderen Oberflächenmaterialien, einschliesslich kranker oder vertrockneter Vegetation, nicht zu beobachten. Im Vergleich zu grünem, gesundem Gras reflektiert z.B. trockener Boden oder trockenes Gras im sichtbaren Bereich mehr während diese im NIR deutlich weniger Licht reflektieren. Abbildung 3 zeigt dies deutlich. Effektiv kann dieser Effekt, durch die Erstellung von geeigneten Verhältniszahlen zwischen dem Rot- und NIR-Kanal, zur Beurteilung des Gesundheitszustandes der Rebkulturen genutzt werden. Eine einfache und weit verbreitete Verhältniszahl ist der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Dieser wird wie folgt berechnet:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Eine ausführliche Untersuchung verschiedener Vegetationsindices ist unter anderem in der Dissertation von [KURZ 2003] zu finden. Im erweiterten Rahmen des vorliegenden Projekts wurden auch verschiedene Vegetationsindizes auf ihre Eignung überprüft. Die Resultate sind zu finden in der Diplomarbeit von [BROSI 2006].



Abbildung 3: Spektrale Signatur von gesunder bzw. kranker Vegetation Bildquelle: [NASA & Utah State University 2003]

#### 3.2 Geometrische Entzerrung zu einem True Orthophoto

Da sich die Projektionszentren der getrennt erfolgten Aufnahmen der einzelnen Bildkanäle in der Grössenordnung von 3 m unterschieden, stellte die Koregistrierung der einzelnen Kanäle sehr hohe Anforderungen. Dazu wurde die markante Topographie der Rebenkultur mit Hilfe eines Oberflächenmodells (DOM) modelliert, welches als Basis für die Generierung von True Orthophotos der einzelnen Bildkanäle diente. Mit diesem Ansatz konnte gewährleistet werden, dass in beiden Kanälen die homologen Objektpunkte bzw. 'Surfel' erfasst und verglichen werden. In [BROSI 2006] wurde aufgezeigt, dass die Koregistrierung der Bildkanäle mit Hilfe des True Orthophotos trotz einer GSD von 7 cm mit einer Genauigkeit von < 1 Pixel realisiert werden konnte.



Abbildung 4: Ausschnitt des erstellten True Orthophotos als Falschfarbenbild

Da die zwischen den Rebstöcken liegenden Grasflächen nicht analysiert werden sollten, wurde ein geometrischer Buffer mit einer Breite von  $\pm 25$  cm berechnet und als Maske über das erstellte True Orthophoto gelegt. Als Ergebnis resultierte ein Bild, welches nur noch die zu untersuchenden Pixel enthielt, welche alle auf der Oberfläche der Rebstöcke lagen.

#### 3.3 Radiometrische Korrekturen

Bei der Aufnahme und der Kombination der Bilddaten waren in diesem Fall die folgenden wichtigsten radiometrischen Fehlerquellen zu beachten:

- unterschiedliche Beleuchtungsverhältnisse zum Zeitpunkt der Aufnahme der einzelnen Spektralkanäle (Sonnenstand, Wolken, etc.)
- unterschiedliche Sensoren mit unterschiedlichen Integrationszeiten und Blendeneinstellungen

Um eine radiometrische Korrektur von Bilddaten zu ermöglichen, werden in der Regel Referenzflächen mit bekannten radiometrischen Eigenschaften verwendet. Diese sollten eine Korrektur von unterschiedlichen Beleuchtungsverhältnissen und Kameraeinstellungen ermöglichen. In unmittelbarer Nähe zum Rebenfeld befand sich ein Bewässerungssee mit einer Tiefe von ca. 3m. Da Wasser vor allem im nahen Infrarot praktisch das gesamte Licht absorbiert, konnte dieser als Referenz für schwarz verwendet werden. Als Referenz für weiss konnten zwei Referenztafeln (Grösse ca. 40 x 70 cm) von der Firma Leica Geosystems Heerbrugg ausgeliehen werden. Diese Tafeln sind mit Bariumsulfatfarbe bestrichen und gewährleisten über den gesamten benutzten Spektralbereich eine Reflektanz von > 98%.

## 4 Resultate

Die Referenzdaten für die 240 Testparzellen lagen in Form von Prozentwerten, welche dem Anteil an kranken Blättern pro Testparzelle entsprechen, zur Verfügung. Teile dieser Referenzdaten dienten als Trainingsgebiete, der Rest zum Vergleich mit den ausgewerteten Bilddaten. Dazu wurden die gemittelten NDVI-Werte der einzelnen Testparzellen mit den Referenzdaten verglichen. In Abbildung 5 sind auszugsweise die Ergebnisse für die 24 Testparzellen der Reihen 3 und 7 aufgeführt.



Abbildung 5: Auszug aus dem Vergleich mit Referenzdaten (links: Reihe 3, rechts: Reihe 7)

Die Diagramme zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den automatisch bestimmten Werten aus der Fernerkundung und den Referenzdaten. Um eine quantitative Aussage über die Qualität der Klassifizierung bzw. Vitalitätsbestimmung zu ermöglichen, wurden ein Korrelationskoeffizient pro Reihe (je 24 Testparzellen) sowie die Standardabweichung der automatischen Klassifizierung einer einzelnen Parzelle berechnet.

Reihe – Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Tot.
Korrelationskoeffizient [r]	0.69	0.93	0.94	0.89	0.24	0.85	0.89	0.87	0.00	0.00	0.87
Standardabweichung [% kranke Blätter]	9%	13%	11%	14%	15%	15%	13%	13%	12%	11%	13%

Tab. 1: Berechnung der Korrelationskoeffizienten und der Standardabweichung pro Reihe

In Tab. 1 fallen vor allem die offenbar schlecht korrelierten Reihen 9 und 10 auf. Eine genauere Betrachtung dieser beiden Reihen und nachträgliche Abklärungen bei den Spezialisten der Syngenta ergaben jedoch, dass diese Reihen als Abgrenzung zu anderen Kulturen dienen und auf Grund des starken Krankheitsbefalls nicht konsequent bonitiert wurden. In Abbildung 6 ist stellvertretend die Reihe 9 aufgeführt. Dort fällt auf, dass die bonitierten Werte aus den oben genannten Gründen durchgehend 80% betragen.



Abbildung 6: Beispiel für eine schlecht korrelierte Reihe mit unvollständiger Bonitierung (durchgehend 80%)

Derselbe Sachverhalt lag zumindest teilweise auch bei Reihe 5 und 1 vor. Alle anderen Reihen mit konsequenter Bonitierung sind ausserordentlich hoch korreliert. Eine Beurteilung über sämtliche Testparzellen ergab einen Korrelationskoeffizienten von 0.87 und eine Standardabweichung der Klassifizierung einer Testparzelle von 13% (unter Annahme einer fehlerfreien Bonitierung) bzw. von 9% (unter Annahme einer Bonitierungsgenauigkeit von 10%, vergleiche auch Abbildung 6). Weitere Resultate sind in [BROSI 2006] dokumentiert.

# 5 Schlussfolgerungen

In diesem Artikel wurden erste Untersuchungen zur automatischen Vitalitätsbestimmung in der agrochemischen Feldforschung mittels Multispektralaufnahmen aus Minidrohnen beschrieben. Im vorgestellten ersten Pilotversuch kamen wegen Gewichts- und Zeitrestriktionen improvisierte Bildsensoren für den sichtbaren einerseits und den NIR-Spektralbereich andererseits zum Einsatz. Trotz der daraus resultierenden getrennten Bildflüge pro Spektralkanal mit jeweils unterschiedlichen Bildsensoren, konnten die erfassten Bilddaten mit einer GSD von nur 7 cm mit aufwändigen photogrammetrischen Berechnungen exakt koregistriert werden. Auch die pragmatisch durchgeführte radiometrische Korrektur hat sich als zweckmässig und einfach durchführbar erwiesen. Der Vergleich der automatisch bestimmten Vitalitätsbestimmung für Reben mit den Referenzdaten ergab eine sehr hohe Korrelation von ca. 0.9 und eine mittlere 'Klassifizierungsgenauigkeit' pro Testparzelle von ca. 10%. was darauf hin deutet, dass die automatische Vitalitätsbestimmung aus sehr hoch aufgelösten Fernerkundungsdaten im Falle von Reben eine ähnliche Qualität aufweist wie die Referenzbonitierung.

Allgemein lässt sich festhalten, dass der Pilotversuch mit sehr erfolgversprechenden Resultaten abgeschlossen werden konnte. Trotz der Kompromisse, die auf Grund der fehlenden Multispektralsensoren in dieser Gewichtsklasse gefällt werden mussten, dürfen die erzielten Resultate als sehr positiv bezeichnet werden. Die Allgemeingültigkeit der vorliegenden Resultate mit Rebkulturen müssen allerdings mit Versuchen bei anderen Kulturarten (z.B. Kartoffeln) noch bestätigt werden.

Das vorliegende Pilotprojekt hat aufgezeigt, dass sich die Drohnen basierte Fernerkundung zu einem sehr mächtigen und flexibel einsetzbaren Werkzeug in der agrochemischen Feldforschung entwickeln könnte.

# 6 Ausblick

In diesem Sommer werden die vorgestellten Untersuchungen fortgesetzt. Das IVGI hat als neue Sensorplattform die Mikrodrohne md4-200 der Firma microdrones GmbH angeschafft. Diese Drohne zeichnet sich durch ihre Sicherheit und Einfachheit bei der Bedienung aus. Das maximale Abfluggewicht, des mit vier elektrisch betriebenen Rotoren ausgestatteten Fluggerätes beträgt allerdings nur knapp ein Kilogramm. Bemerkenswert ist, dass die maximale Nutzlast bei diesem Gewicht dennoch 300 g beträgt. Die Mikrodrohne ist mit einem GPSgestützten Fluglageregelungssystem und einem Datenlink zur Übertragung von Videosignalen an eine Bodenstation ausgestattet. Verschiedene leichtgewichtige Sensoren (z.B. Videokamera, RGB-Kamera oder thermale Infrarotkamera) können mitgeführt werden. Was aktuell noch fehlt ist ein geeigneter Multispektralsensor zur Vegetationsanalyse. Deshalb wurde FHNW-intern das Forschungsprojekt MultiSpectralMicroSensor (MSMS) gestartet, in welchem in Zusammenarbeit mit dem Institut Power and Signal Processing (IPSP) der FHNW ein Prototyp eines leichtgewichtigen Multispektralsensors entwickelt werden soll. Ein erster Prototyp wird voraussichtlich im Sommer 2007 im Versuchsareal der Syngenta getestet werden können.

# 7 Literaturverzeichnis

- BROSI, D., 2006: Modellhelikopter gestützte multispektrale Vegetationsklassifizierung und 3D-Modellierung – Teil 1: Vegetationsklassifizierung. Diplomarbeit IVGI / FHNW.
- EUGSTER, H., 2007: Georegistrierung mittels Minidrohnen erfasster Videosequenzen -Ansätze und Genauigkeitsanalyse. Muttenz: Beitrag zur Dreiländertagung 2007 der SGPBF, DGPF und OVG
- KURZ, F., 2003: Schätzung von Vegetationsparametern aus multispektralen Fernerkundungsdaten. München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (Reihe C, Dissertationen, Heft Nr. 569), ISBN: 3-7696-5008-5.
- NASA & UTAH STATE UNIVERSITY, 2003: Space Grant Extension Program Tutorial Near Infrared. extnasa.usu.edu/on\_target/ot\_tutorials\_nir.html (Online: 27. April 2007)
- TUCKER, C.J., 1979: Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of the Environment, 8:127-150.

# From HyMap Imagery to Spatially Distributed Vegetation Water Contents – A Comparison of Different Estimation Approaches Based on Canopy Reflectance Modelling

## MICHAEL VOHLAND<sup>1</sup> & SEBASTIAN MADER<sup>2</sup>

Summary: In this study, a small portion of a HyMap image was used to compare the performance of different strategies to invert a canopy reflectance model (PROSPECT + SAIL) for the retrieval of vegetation water contents. For the classical strategy of iterative optimisation, the Nelder Mead Simplex method was applied. With reference to some ground validation data, this approach provided very reliable estimates, but it also suffered from its low computation rate. As an alternative, model inversion was accomplished by means of a feed forward Artificial Neural Network (ANN). The network was trained by a backpropagation algorithm using thousands of spectra simulated by PROSPECT + SAIL in the direct mode. Simulated spectra were also used to calibrate a Partial Least Squares regression model. When applied to the HyMap image, the ANN approach provided results with a clear shift towards higher estimates, but also highly correlated with the results obtained by numerical minimisation. Furthermore, the spatial distribution of the retrieved data fields showed a clear matching in terms of identical spatial patterns that were characterised by fractal dimensions. Clearly different from this, the PLS approach did not provide consistent results especially for high water content values. The shortcomings can be traced back to the purely linear modelling approach, which provides a less efficient generalisation capacity compared to a properly trained neural network.

#### 1 Introduction

Hyperspectral reflective data enable a detailed quantitative assessment of vegetation parameters such as leaf area index, canopy chlorophyll or canopy water content. In case of image data, this analysis benefits from the spatial coverage of the data and can provide spatially distributed vegetation data fields. This information is potentially appropriate to calibrate or validate spatially distributed process models that make use of or provide plant canopy variables by means of crop growth modelling or hydrologic and metabolic balancing.

In this study, hyperspectral image data of the HyMap sensor (Integrated Spectronics, Baulkham Hills, Australia) with a ground resolution of 5 m were used to derive the canopy water content of summer barley by means of a canopy reflectance model (PROSPECT + SAIL). For this purpose, different techniques of model inversion were applied (numerical minimisation, Artificial Neural Networks, Partial Least Squares Regression; see section 2), and the retrieved data were compared quantitatively by statistical measures. For a selective validation, ground data of a total of 12 sub-plots were collected during the overflight. Furthermore, the spatial distributions of the

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Remote Sensing and Geoinformatics, Remote Sensing Department, Faculty of Geography and Geosciences, University of Trier, 54286 Trier, Germany

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Remote Sensing Department, Faculty of Geography and Geosciences, University of Trier, 54286 Trier, Germany

stand variables resulting from the different approaches were studied in detail for their matching, as this allows an assessment of the applied approaches' consistency.

## 2 Retrieval of stand variables by canopy reflectance model inversion

Different techniques can be applied to extract canopy characteristics from measured remote sensing data by inverting a canopy reflectance model. In the classical approach of numerical minimisation, measured reflectances are iteratively compared to model simulations until the best match (global minimum) is found. Care must be taken (e.g. by using a range of initial solutions) to get a reasonable approximation and not to get trapped by local minima. This may be – depending on the performance of the respective numerical algorithm – very time consuming and therefore computationally not feasible for the inversion of e.g. large image portions. As an alternative, lookup tables (LUT) can be used to increase the rate of model inversion. In this approach, a data base is generated containing sets of input variables and corresponding reflectance values simulated in the direct modelling mode. In the inversion, reflectance measurements are compared to the stored data to identify the closest cases and to extract the appropriate canopy variables.

Conceptually different approaches are provided by estimation models which first are calibrated (to fit the response surface between reflectance values and canopy variables) and afterwards applied to retrieve estimates for the complete set of reflectance measurements of interest. For this calibration, the use of synthetic databases simulated by physically based reflectance models is recommendable as they can cover a wide range of parameter combinations (BARET et al., 2000). For hyperspectral data, Partial least Squares (PLS) regression may be used. As the PLS factoring is based on the variance of both the spectral information and the target variable, PLS regressions usually exploit the information that is inherent in the data efficiently for a powerful prediction. Even more sophisticated is the capacity of artificial neural networks (ANN) to provide estimates of the complex response surfaces when being trained on hyperspectral data. Once a network is trained, the network approach is computationally fast and therefore applicable to large spectral datasets.

## 3 Materials

The study site is located near Newel in the Bitburger Gutland (Rhineland-Palatinate, Germany), where one field (4.7 hectares) cropped with summer barley in 2005 was selected for further investigation. For the Bitburger Gutland, a data set of the HyMap airborne imaging sensor was acquired on the 28th of May (acquisition time: 9:01:20 UTC) during the HyEurope 2005 campaign. The HyMap data provide 126 bands with bandwidths ranging from 12.9 to 21.3 nm that cover a spectral range from 434 to 2486.5 nm (central wavelengths of the first and last band); the ground resolution was approximately 5 m.

In the preprocessing, an across-track illumination correction was performed for a spatial subset excluding forested areas. The FLAASH (Fast Line of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) module of ENVI<sup>TM</sup>, based on the MODTRAN4 radiation code (MATTHEW et al., 2000), was used for the atmospheric correction. A parametric geometric correction was per-

formed by integrating a high resolution digital elevation model, GPS ground control points and flight navigation data provided with the HyMap data using the PARGE<sup>™</sup> software (SCHLÄPFER & RICHTER, 2002). Some noisy bands (e.g. those near the water vapour absorption features) were eliminated; thus, a total of 114 spectral bands were finally used for the image inversion.

On the 27th and 28th of May, spectroradiometer measurements using an ASD Field Spec II instrument (Analytical Spectral Devices, Boulder, CO) were performed for a total of 12 sub-plots with a size of 50 cm  $\times$  50 cm. The spectral readings were taken integratively over the sub-plots' area with nadir view in the principal plane. Afterwards, the exact position of each sub-plot was located using a differential GPS (GPS Pathfinder Pro XRS; Trimble, Sunnyvale, CA). The subplots' above ground plant material was harvested, the fractions of leaves and stalks were separated from each other and weighed separately in the laboratory. After dehydrating the material at 105°C for 24 hours, the total water contents of both fractions were calculated by subtracting the dry weights from the previously measured fresh weights.

## 4 Methodology – PROSPECT + SAIL modelling approach and applied inversion techniques

For this investigation, the PROSPECT model describing the optical properties of plant leaves (BARET & FOURTY, 1997) has been coupled with the SAIL model (VERHOEF, 1984), a 1 D turbid medium radiative transfer model that is suited for homogeneous vegetation canopies. Leaf reflectance and transmittance from 400 to 2500 nm is described by PROSPECT as a function of the leaf mesophyll structure parameter N, the chlorophyll a+b concentration ( $C_{ab}$ ), the leaf equivalent water thickness ( $C_w$ ) and the leaf dry matter content ( $C_m$ ). For a given illumination and viewing geometry, SAIL calculates the canopy bidirectional reflectance using the leaf optical properties, canopy structure (leaf area index LAI, mean leaf inclination angle  $\theta_l$ , hot spot size parameter s) and the reflectance of the underlying soil ( $\rho_s$ ). The parameter skyl refers to the atmospheric conditions and describes the fraction of diffuse illumination.

However, several sets of model parameters may produce very similar or even fully identical spectral signatures. This parameter equifinality is one main reason for the ill-conditioned nature of model inversion and may be reduced by reasonable constraints in the inversion procedure (COMBAL et al., 2002). For this purpose, we fixed some parameters (N to 1.3, s to 0, and skyl to 0.1) and coupled the equivalent water thickness and the leaf dry mass at a ratio of 4:1; this ratio equals a foliage moisture content (FMC) of 400 % and can be assumed to be a typical value for fresh plant material (for a detailed discussion refer to VOHLAND & JARMER, 2007). To define  $\rho_s$ , soil samples were taken in the field to identify a typical mean background soil reflectance that was afterwards used in the inversion.

For the retrieval of the five parameters  $C_{ab}$ ,  $C_w$ ,  $C_m$ , LAI and  $\theta_l$ , we started with the classical strategy to minimise the merit function numerically (Figure 1) using the Nelder-Mead Simplex method (NELDER & MEAD, 1965). To increase the probability of identifying the merit function's global minimum, we restarted the algorithm several times with a repeated recovery of the initial

values with previous results. In the last minimisation loop, the coupling of  $C_w$  and  $C_m$  was removed to allow a comprehensible and moderate variation of the foliage moisture content.



Figure 1: Numerical minimisation to invert PROSPECT + SAIL on the HyMap image.

In total, the numerical optimisation was performed for each pixel of the selected barley plot (n = 1899). A validation of these results was accomplished with the plant samples collected in the field. For each sub-plot, the GPS measured positions were used to centre a window of  $3 \times 3$  pixels in the HyMap data. Within this window, we extracted the best-fitting pixel with the smallest spectral deviations from the ground-measured spectra (see VOHLAND et al. 2006 for a detailed description). For the 12 pixels finally selected, the inverted values of  $C_w \times LAI$  were compared to the measured water contents of the leaf fraction.

As an alternative approach, a three-layer feed forward ANN was trained on a number of sample spectra simulated by PROSPECT + SAIL in the direct mode. For the data of this study, the number of input and output neurons was given by the number of spectral bands (114) and the model parameters that were neither fixed nor known (LAI,  $\theta_l$ ,  $C_{ab}$ ,  $C_w$ ,  $C_m$ ). One critical point in this approach is to select an appropriate number of hidden neurons, as it decides about the net's capability to represent the reflectance model's complexity as well as the net's generalization power. We followed the rough guide line of the geometric pyramid rule (MASTERS, 1993), by which the number of hidden neurons is computed as the square root of the product of the number of input and output neurons (n = 24 in this case). As activation function, the hyperbolic tangent was used according to the study of KALMAN & KWASNY 1992.

The network was trained with an improved version of the RPROP algorithm (RIEDMILLER & BRAUN, 1993; IGEL & HÜSKEN, 2000). To prepare the training samples, PROSPECT + SAIL were parametrised as described above; again,  $C_w$  and  $C_m$  were coupled and their ratio was allowed to vary between 3.8:1 and 4.2:1. In total, 152,000 parameter combinations were generated by random to simulate canopy reflectances. From these data, 76,000 samples were selected randomly for the training procedure, and the remaining samples were used as independent data to test the network's performance. Since the errors obtained with the test data did not differ significantly from the errors that remained after the training, the ANN, now trained and validated, was then applied to the image data.

Different from ANN, PLS regression provides a purely linear model for estimating canopy variables. Similar to the principal component analysis (PCA), it produces non-correlated factor scores from the original and highly correlated predictor variables (X, HyMap reflectance values) to estimate Y (total water content of the leaf fraction). But it differs from PCA in that this extraction also reflects the covariance structure between X an Y. Thus, the selected components (latent variables) are supposed to provide an optimum for explaining both X and Y. This step is followed by a regression where the decomposition of X is actually used to predict Y (ABDI, 2003). One critical point might be the lack of generalization power due to an over-fitting in the calibration. This can be avoided by model validation performed internally (cross-validation) or externally with an independent dataset. In our study, we randomly extracted 5,000 samples from the ANN training data (PROSPECT + SAIL simulations) for the PLS model calibration, and another 5,000 samples were used for an external validation. After a successful validation (see section 5), the PLS approach was also applied to the HyMap image.

The data fields retrieved for the summer barley plot applying the ANN and PLS approaches to the HyMap image were then compared to the results of numerical minimization in terms of absolute values and spatial patterns (see Figure 2 with an overall view of the selected procedure).



Figure 2: Workflow to compare the different inversion techniques in this study.

## 5 Results & Discussion

In the numerical minimization that was performed for each pixel, we retrieved the water content in g per cm<sup>2</sup> leaf area, which can be scaled up to the canopy ( $g \times cm^{-2}$  ground area) by multiplication with the LAI. For a pointwise validation, the ground measured water contents of the leaf fraction were utilised as described above. This validation proved reliable estimates in terms of the coefficient of determination ( $r^2$ ), the root mean squared error (RMSE) and the percentage RMSE (RMSE × measured mean<sup>-1</sup>) (Figure 3).

The retrieved values for the selected summer barley plot (n = 1899) were afterwards compared to the statistics of the ANN- and PLS-approach. For the neural network, we found results for  $C_w \times LAI$  to be significantly higher than for the Nelder Mead inversion (Table 1). For a detailed comparison, the other canopy variables obtained by the neural network have also to be analysed. Here, estimates for the LAI and the canopy dry mass were also clearly higher, whereas the results for  $\theta_1$  were very low and showed only little variation.



Figure 3: Scatterplot of pixel-based numerical inversion results for LAI ×  $C_w$  against measured field data (50 × 50 cm<sup>2</sup> sub-plots, n = 12).

	Numerica	l Minimisati Mead)	on (Nelder	Artificial Neural Network			
	mean	stdv <sup>a</sup>	varcoeff <sup>b</sup>	mean	stdv <sup>a</sup>	varcoeff	
LAI ×C <sub>w</sub> (g cm <sup>-2</sup> )	0.1154	0.0168	14.55	0.1823	0.0177	9.69	
LAI	5.93	0.53	8.67	6.71	0.43	6.40	
LAI × $C_{ab}$ (µg cm <sup>-2</sup> )	263.6	33.7	12.88	258.9	26.3	10.17	
LAI ×C <sub>m</sub> (g cm <sup>-2</sup> )	0.0278	0.0041	15.36	0.0425	0.0043	10.12	
θι (°)	34.1	3.86	11.32	25.7	0.63	2.45	
$C_w \times C_m^{-1}$	4.15	0.09	2.12	4.29	0.09	2.07	
mean RMSE (reflectance) <sup>c</sup>	0.0158			0.0264			

Table 1: Statistics of inversion results (n = 1899) obtained by numerical optimisation and ANN.

a standard deviation

<sup>b</sup> coefficient of variation (%)

inverted variables are used for spectra reconstruction in the direct mode of PROSPECT + SAIL; reconstructed spectra are afterwards pixel-wise compared to the HyMap spectra, RMSE: mean for all wavelengths and pixels

Both approaches did not differ very much with respect to the quality of reproducing the HyMap spectra (Table 2); thus, the differences in the obtained values of the canopy variables seem to have evolved from the ill-posed problem of model inversion, and could have been partly triggered by the slightly different coupling of  $C_w$  and  $C_m$  in both approaches.

In the PLS approach, we first identified a model based on 8 latent variables to predict LAI ×  $C_w$ . For the 5,000 calibration samples covering a range from 0.01 to 0.24 g H<sub>2</sub>O per cm<sup>2</sup> canopy area, this model provided a value for r<sup>2</sup> of 0.981, and the RMSE (g cm<sup>-2</sup>) amounted to 0.006; these terms kept stable in the validation with another 5,000 test samples (r<sup>2</sup> = 0.977; RMSE = 0.007 g cm<sup>-2</sup>). Nevertheless, when applied to the HyMap image, results were not consistent, as LAI ×  $C_w$  was estimated with negative values for 211 pixels. Thus, we decided to apply a model with only 3 latent variables that were still sufficient to explain more than 95 % of the LAI ×  $C_w$  variation in the calibration. For the summer barley plot, this model provided a mean leaf water content (canopy level) of 0.1367 g cm<sup>-2</sup>, the standard deviation was 0.0138 g cm<sup>-2</sup>. Although these values seem to fit quite well to the results of Nelder Mead and ANN, the scatterplots reveal significant differences (Figure 4).



Figure 4: Scatterplots of pixel by pixel-results for LAI  $\times$  C<sub>w</sub> (n = 1899).

For the ANN results, there is a clear bias in the scatterplot, but the correlation with the Nelder Mead estimates is rather high. The retrievals of the PLS regression seem to be unconfident for the range beyond 0.12 g  $H_2O \times cm^{-2}$ , as results do not match neither to the Nelder Mead nor to the ANN-based estimates. However, for the pixels with medium to low water contents (PLS-values < 0.12 g cm<sup>-2</sup>, n = 168) correlation with Nelder Mead is satisfactory (r<sup>2</sup> = 0.69). The limitation of the PLS approach for high values is probably due to its linearity, which restricts its generalization power in case of gradually saturating spectra paralleled by canopy variables still changing distinctly.

Beyond a purely pixel-based quantitative analysis, the inversion results were compared for their spatial distribution and the spatial details recognisable in the analysed image portion. This issue is highly relevant, as one benefit from remote sensing data is the spatial coverage they provide, so they can be used for calibrating or validating spatially distributed modelling approaches in hydrology or landscape ecology, for example. First, the data fields retrieved by the different approaches were interpreted visually, which reveals clear similarities between the Nelder Mead and ANN data, but also an obviously different spatial distribution provided by the PLS approach (Figure 5).



Figure 5: Spatially distributed results for LAI  $\times$  C<sub>w</sub> as retrieved by numerical minimisation, ANN and PLS regression for the selected summer barley plot (bright pixels indicate high values; images were scaled identically).

A more quantitative and normalized method to analyse the spatial variation is provided by the calculation of fractal dimensions (D), that were derived from the variograms of our data fields. In detail, the incremental slope (s) of the log-log plot of semivariance against sample interval (lag) was used to calculate D as (3 - s/2) (XIA & CLARKE, 1997).



Figure 6: Piece-wise fractal dimensions of the retrieved data fields (all approaches) for LAI  $\times$  C<sub>w</sub>.

For the results of Nelder Mead and ANN, the fractal dimensions show a nearly perfect match in course (Figure 6), which verifies the analogy also found in the visual comparison. For the PLS regression results, differences of D are more pronounced, and the value patterns are less congruent. Beyond a distance of 60 m (12 pixels), all approaches show a clear scattering of D that can be traced back to the sills of the variograms that are reached at this lag.

## 6 Conclusions

The following conclusions can be drawn from this study:

• The validation by the data of 12 ground sub-plots proved the retrieval of the canopy water content (leaf fraction, LAI  $\times$  C<sub>w</sub>) by the Nelder Mead algorithm to be reliable and relatively

precise. The neural network approach provided results with a clear shift to higher values. Nevertheless, the estimates of both approaches were highly correlated and showed a good match concerning their spatial distributions.

- A fast computation is feasible by using ANN (after being trained) and PLS regression. However, the latter did not provide dependable results when applied to the canopy reflectances contained in the image data. Shortcomings might result from the linearity of this approach, which cannot keep up with the more complex and in our study more efficient fitting capacities of properly trained neural networks.
- A larger image portion could be inverted rapidly by the neural network approach. As the ANN results were consistent in terms of the spatial distribution obtained, the resulting data field is most likely qualified to validate the output of e.g. spatially distributed process models that make use of the canopy water content (plant growth or SVAT models, for example).

#### Acknowledgements

This study was financially supported by the Forschungsfonds of Trier University. We would like to thank the landowner of the investigated plot, Matthias Mohn. Many thanks to Thomas Jarmer and Christoph Knote for their substantial support. We would like to thank the following people who assisted in the field work: Henning Buddenbaum, Erik Mohr, Franz Ronellenfitsch and Martin Schlerf.

#### References

- ABDI, H., 2003: Partial least squares regression (PLS regression). In: Encyclopedia for research methods for the social sciences, M. Lewis-Beck, A. Bryman & T. Futing (eds.) (Sage Publications), 772-795.
- BARET, F. & FOURTY, T., 1997: Estimation of leaf water content and specific leaf weight from reflectance and transmittance. Agronomie, **17**: 455-464.
- COMBAL, B., BARET, F., WEISS, M., TRUBUIL, A., MACÉ, D., PRAGNÈRE, A., MYNENI, R., KNYAZIKHIN, Y. & WANG, L., 2002: Retrieval of canopy biophysical variables from bidirectional reflectance using prior information to solve the ill-posed inverse problem. Remote Sens. Environ., 84: 1-15.
- IGEL, C. & HÜSKEN, M., 2000: Improving the Rprop learning algorithm. In: Proc. Second International ICSC Symposium on Neural Computation, 115-121.
- KALMAN, B. L. & KWASNY, S. C., 1992: Why tanh: Choosing a sigmoidal function. In: Proc. International Joint Conference on Neural Networks, vol. IV, 578-581.
- MASTERS, T., 1993: Practical Neural Network Recipes in C++. Academic Press, 495 pp.
- MATTHEW, M. W., ADLER-GOLDEN, S. M., BERK, A., RICHTSMEIER, S. C., LEVINE, R. Y., BERNSTEIN, L. S., ACHARYA, P. K., ANDERSON, G. P., FELDE, G. W., HOKE, M. P., RATKOWSKI, A., BURKE, H.-H., KAISER, R. D. & MILLER, D. P., 2000: Status of Atmospheric Correction Using a MODTRAN4-based Algorithm. In: Proc. SPIE 4049, 199-207.
- NELDER, J. A & MEAD, R., 1965: A Simplex method for function minimization. Comput. J., 7: 308-313.

- RIEDMILLER, M. & BRAUN, H., 1993: A direct adaptive method for faster backpropagation learning: the RPROP algorithm. In: Proc. of the IEEE Intl. Conf. on Neural Networks, 586–591.
- SCHLÄPFER, D. & RICHTER, R., 2002: Geoatmospheric Processing of Airborne Imaging Spectrometer Data Part1: Parametric Orthorectification. Int. J. Rem. Sens., 23: 2609-2630.
- VERHOEF, W., 1984: Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modelling: the SAIL model. Remote Sens. Environ., **17**: 125-141.
- VOHLAND, M. & JARMER, T., 2007: Estimating structural and biochemical parameters for grassland from spectroradiometer data by radiativ transfer modelling (PROSPECT + SAIL). Int. J. Rem. Sens., in press.
- VOHLAND, M., JARMER, T. & MADER, S., 2006: Assessment of the leaf area index (LAI) for summer barley from field spectroradiometer and HyMap image data using the PROSPECT + SAIL models. In: Proc. 2nd Workshop of the EARSeL Special Interest Group on Land Use and Land Cover, 249-257.
- XIA, Z. G. & CLARKE, K. C., 1997: Approaches to Scaling of Geospatial Data. In: Scale in Remote Sensing and GIS, D. A. Quattrochi & M. F. Goodchild (eds.) (CRC Press), 309-360.

# Design of a Multi-Camera Orientation and Calibration System for Human Surface Measurement and Motion Capture

## GERHARD SCHROTTER<sup>1</sup> & PASCAL FUA<sup>2</sup>

Abstract: Human motion capture and surface measurement setups often consist of multiple synchronized cameras, which have to be oriented and calibrated for metric reconstruction. The advantage of this method is its fully automatic character with having a freely moving wand as its only calibration object. This paper presents a convenient and flexible method to achieve the interior and exterior parameters. The scripts for the detection of image points and the establishing of correspondences are feeding a database, making storage, updates and backup flexible and secure. To overcome the dizzying forest of data processing, a complex scene description language is programmed to handle the task of data collection from the database. Furthermore, this language optimizes the procedure of simulation and design of network solutions.

## 1 Introduction

In this paper we describe software tools and a well-defined scene description language (SDL) for the calibration and orientation of a synchronized multi image acquisition system. The term multi image refers to multiple images acquired from different positions in space describing the same scene and multi-image sequence is associated with multi images acquired during the time interval. The camera calibration and orientation is based on stationary cameras and moving targets, which are fixed on a wand. It uses the image sequence acquisition character to get multiview correspondences of the image coordinates. The mentioned method can be used with different sensors and focal lengths.

In the following chapter (2) of the paper we take a short look at the state of the art and different methods and devices. In chapter (3) we explain briefly the hardware and software components and focus then on the relative orientation component (4) and the description of the bundle adjustment SDL (5).

## 2 State of the Art in Multi-Camera Calibration with Moving Objects

Various different techniques and calibration devices for multi-camera orientation and calibration have been proposed. The most common technique is the classical test field method [2, 7]. A well defined and measured test field is used to achieve the camera parameters. The disadvantage of this method is the time consuming construction of such a field and the inflexibility of not being transportable (Figure 1(a)). Furthermore, the test field is only useable for a certain size of the object. This drawback leads to the moving devices applications. In the simplest version (in the meaning of identification), one single easily detectable marker has to be tracked through image sequences of multiple pre-calibrated cameras. A laser pointer is waved through the volume of

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> gerhard.schrotter@geod.baug.ethz.ch

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> pascal.fua@epfl.ch

interest (Figure 1(j)). This avoids the necessity of homologous feature identification for the establishment of multi-view correspondences [6, 18]. Multi-camera environments [4, 17], which are primarily equipped and designed for real-time 3D acquisition, use advanced calibration methods based on a moving plate. These calibration methods do not require a 3D calibration object with known 3D coordinates (Figure 1(b)). However, they share the main drawback with the old classical methods. The moving calibration plate is not visible in all cameras and the partially calibrated structures have to be fitted together in a time-consuming way. KITAHARA et





Figure 1: Different Calibration methods. From the classical test-field (a), the moving plate (b), the moving small 3D test-field (c,d) to more flexible methods like the two way calibration approach (e,f,g), the scale bar approaches (h,i) and the waving laser pointer method (j). The images (k,l) show some application developed at CVLAB for augmented reality purpose using natural points and the estimation of homographies.

Figure 2: Image sequence of three synchronized CMOS video cameras. Some sample frames (1, 100, 200, ...,800) of the 806 ( 34s) frames long video sequence.

al. [10] calibrated their large scale multi-camera environment by using a classical direct method. The necessary 3D points are collected by a combined use of a calibration board and a 3D lasersurveying instrument. LEE et al. [11] established a common coordinate frame for a sparse set of cameras so that all cameras observe a common dominant plane. Objects, which are moving in this plane, are tracked and from their trajectories the external parameters of the cameras in one coordinate system are estimated. Another way of fixing a datum and therefore getting

approximations for the position and attitude of the cameras is a method used by the company BTS [3] former emotion3D (Figure 1(e)). The initial images of the sequence are used to take a snapshot of a reference frame. This reference frame sets the origin of the coordinate system of the working volume. The second phase of acquisition captures the movement of a wand that is systematically swept across the working volume. In this second phase the optical model of the cameras and their orientation in space are estimated. The Computer Vision Laboratory (CVLAB) at EPF Lausanne developed a calibration method for augmented reality purpose (Figure 1(k,l)). The interested reader is referred to [15].

We achieved an automation of the calibration and orientation of our stationary multi image system through moving targets, which are fixed on a wand (Fig. 1(g,h,i)). Different wands can be used and the cameras can be combined with the well known Vicon Motion Capture system. The synchronized image sequence acquisition character is used to get multi-view correspondences of the image coordinates. Through the known distances between the spheres/targets of the moving wand (Fig. 2), additional constraints can be introduced and allow to solve the linear equation system with all necessary additional parameters of interior orientation [12].

#### 3 Overview of Hardware and Software-Components

The whole hardware system is designed by NorPix<sup>TM</sup> [13]. It consists of the following main hardware modules:

 Three standard PCs with two separate discs; for every camera one. The PCs are running with Windows XP and are connected through an internal network. One PC is adopted as master, controlling the StreamNet Server<sup>TM</sup>. Every PC is equipped with two FireWire-Cards.

Name	BASLER A620 Series/IEEE 1394		
Sensor Size	1280x1024		
Sensor Type	2/3" Progressive Scan CMOS		
Pixel Size	6.7 x 6.7 [micron]		
Max. Frame Rate at Full	24 fps.		
Resolution			
C/M	Mono		
CMount: Focal Length	6 [mm]		

Table 1: Showing the necessary parameters to initialize the procedure of relative orientation and the bundle adjustment.

National Instruments CA1000 control box with PCI6601 digital timing generator. The
plugin allows control of the NI6601 digital timing generator to generate external pulses to
sync all cameras and make sure that the cameras acquire images at the exact same time.
The National Instrument NI 6601 is a PCI adapter that includes a timer counter as well as
8 digital IO ports. NI6601 Plugin is a software plugin for StreamPix<sup>TM</sup> that allows control
of the board. The plugin module allows the timer control to generate an output pulse at a

user-defined frequency. The plugin module can also monitor some input lines on the NI6601 board to allow detection of the recording start and stop conditions. The pulse frequency can run from 0.01 Hz to 1000 Hz.

• The system can be run with six Basler Firewire Cameras. Some important factors as initial values for geometric calibration are listed in Table 1.

The multi-camera system consists of following main software modules:

- StreamPix<sup>TM</sup> is a specialized program designed to provide real time digital video recording to PC memory or hard disk. This program can be multiple started on the slaves and on the master and provides the necessary image sequence for the analysis.
- StreamNet<sup>TM</sup> server is a complimentary module that can control a multiple number of StreamPix<sup>TM</sup> applications running either on the same or on a network of computers. StreamNet<sup>TM</sup> server will control all StreamPix<sup>TM</sup> tasks simultaneously in cases where we need to acquire a multitude of sequences at the same time.
- A StreamNet<sup>TM</sup> plugin controls the National Instrument NI 6601 digital timing generator to generate external pulses to sync all cameras and make sure cameras acquire images at the exact same time. This plugin must be activated in every StreamNet<sup>TM</sup> job started.
- PyDetect (IGP-ETHZ) are Python Scripts for getting the image coordinates and feeding the MySQL database with the coordinates of the extracted targets and the links to the images. Additionally, these scripts design the tags for the input of the following bundle adjustment.
- RDLT (IGP-ETHZ) is a standard C program written for reliable relative orientation. This program is a highly advanced command line tool for relative orientation and can run on any platform. It reads the correspondent image coordinates from the database or plain text and generates the required tags for the following adjustment.



Figure 3: View

: View spots point to the Basler camera, the master and two slave PCs, and the sync unit (from left to right).

 NETREBKO (Network Reconstruction Bundle (C)Kontrol) (IGP-ETHZ) is a parser and bundle adjustement written in C++ and possible to run as command line tool on any platform. Either the MySQL database serves the image coordinates or plain text files in the shared file system provide the required correspondences. This program waits till all input is delivered and shows the user with OpenGL the initial position and final convergence of the iterative adjustment.

#### 4 Initializing the System – the RDLT Component

Relative orientation (RO) has always been and remains one of the most important operations in photogrammetry. In special cases, where the cameras are situated in a left-right arrangement in a stereoscopic or mildly convergent imaging geometry, the determination of initial values can be skipped. In such case the values of the two chosen flexible basis elements and the rotation angles can be set to zero and the basis along the coordinates frame X-axis may be fixed to a certain value. The author has searched through various approaches for RO in computer vision and photogrammetry for difficult configurations and found mainly two approaches useful for implementation.

One approach was introduced by CRONK et al. [5]. They have settled on a Monte Carlo type strategy where a very large number of possible dependent RO solutions are assessed for the available image point pairs. The method devised involves simulating the second camera station at equidistant locations on a tessellated imaginary sphere around the first camera station. At each location, the station's exterior orientation parameters, the five RO parameters of equation, are simulated and provided as the approximate values, and a least squares solution is obtained via the coplanarity model. The results of the RO process for each simulated position are retained in a list and the most plausible solution is taken to be the real solution. The best solution is defined as that which has converged with the lowest RMSE for the image coordinate residuals and which best satisfies certain geometric conditions, such as the object coordinates not being "behind" the camera stations. This method has not until recent times been a viable option due to insufficient computing power; however, standard computers can handle the challenge in a few seconds. This algorithm is implemented in iWitness/Australis [1, 9]. The important procedure in this approach is the detection of the initial values for the camera's position. As the authors [5] mentioned, this values need to be more accurate than the orientation values, which are generally set to zero. Advantage is taken of two simple and logical facts: the stations must at least be facing in a similar direction to see points in common, and the stations would most likely be located side by side, or above and below, or in front and behind, forming a total of six different locations with different possible orientations.

In our case some camera configurations, like it can be in temporal positions capturing a static object (positions right behind each other), are not relevant. Therefore an estimation of relative orientation elements through direct linear transformations (RDLT) can be considered. In the RDLT the basis and rotation matrix elements, which transfers the coordinate system of the moving camera into the fixed on, can be expressed through eight parameters. Therefore, one factor in the equation system can be chosen as a divisor. To decide which divisor should be chosen three normal equations are setup and tested against condition number, convergence, sigma a posteriori, and number of iterations. Out of this, the divisor is determined and the dual solutions calculated. The duality is solved through a distance check in relative object space. The relative orientation is calculated for every pair of images and the best one, in the meaning of

intersection angle and a posteriori variance is taken. A simplified UML activity diagram is shown in Figure 4.



Figure 4: Relative Orientation. Showing the building of the normal equations, the check for the divisor, and the solving of the dual solution.

# 5 Self Calibrating Bundle Adjustment

The presented Scene Description Language (SDL) allows a user to describe the explained selfcalibrating bundle adjustment in a readable and convenient way. This SDL is similar to well known languages like POVRAY [16] or VRML [21]. The SDL consists of identifiers, reserved keywords, floating point expressions, strings, special symbols and comments. The identifiers can be grouped to objects and used in different combination. The establishing of a camera exposure is described in (Fig. 5). (Fig. 5) zooms into the structure of a camera and explains the included tags. The core parses the SDL to an interpreter, which translates the plain text files. These files can be distributed in a network and therefore the collecting of data is solved in a very elegant way. Through the parsing of the files messages will appear, which guide the user through the whole process of the underlying bundle adjustment.



Figure 5: Encapsulating of different objects to a new one. The left image shows an elegant way to define an exposure station. The tag in the right image defines a specific camera for the network.

## 6 Conclusion

We have presented software modules for initialization and a scene description language to describe a bundle adjustment. Every piece of our software is platform independent and the and overview the data in a convenient database allows to store wav http://www.photogrammetry.ethz.ch/research/full body/index.html]. The tools can also be used for calibration of software synchronized cameras (e.g. with libdc1394) and open a wide range for different applications. Any volume of interest can be defined and calibrated. We use the results of the calibration and orientation for marker-less human motion capture and surface measurement, applying different techniques like shape from silhouette and least squares matching for surface measurement and fitting of articulated stick models for motion capture.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] Australis. Photometrix pty. Ltd. http://www.photometrix.com.au/ (last accessed in 04-07).
- [2] BEYER, H. Geometric and radiometric analysis of a CCD-camera based photogrammetric close-range system. Ph.D. thesis, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland, Mitteilungen No. 51, 1992.
- [3] BTS. Bioengineering (fomer eMotion3D). http://www.bts.it/ (last accessed in 05-07).
- [4] CHEUNG, G., BAKER, S. & KANADE, T. Shape-from-silhouette of articulated objects and its use for human body kinematics estimation and motion capture. In Computer Vision and Pattern Recognition, 2003.
- [5] CRONK, S., FRASER, C. & HANLEY, H. Automated metric calibration of colour digital cameras. The Photogrammetric Record, 21:312328, December 2006.
- [6] DOUBEK, P., SVOBODA, T. & VAN GOOL, L. Monkeys -a software architecture for viroom low-cost multicamera system. In 3rd International Conference on Computer Vision Systems, pages 386395, 2003.

- [7] GRUEN, A. & BEYER, H. System calibration through self-calibration. In A. Gruen and T.S. Huang, editors, Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision, Information Sciences 34, 2001.
- [8] GRUN, A. Progress in photogrammetric point determination by compensation of systematic errors and detection of gross errors, 1978.
- [9] iWitness. Photometrix pty. Ltd. http://www.photometrix.com.au/ (last accessed in 04-07).
- [10] KITAHARA, I., SAITO, H., AKIMICHI, S., ONNO, T., OHTA, Y. & KANADE, T. Large-scale virtualized reality. In Computer Vision and Pattern Recognition, Technical Sketches, 2001.
- [11] LEE, W.-S. & MAGNENAT-THALMANN, N. Fast head modeling for animation. In Image and Vision Computing, pages 18(4):335364, 2000.
- [12] MAAS, H. Image sequence based automatic multi-camera system calibration techniques. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 32(B5):763768, 1998.
- [13] NorPix. Digital Video Recording Software. <u>http://www.norpix.com/</u> (last accessed in 04-07).
- [14] OpenCV. Open source computer vision library. <u>http://www.intel.com/research/mrl/research/opencv/</u> (last accessed in 01-06).
- [15] PILET, J., GEIGER, A., LAGGER, P., LEPETIT, V. & FUA, P. An all-in-one solution to geometric and photometric calibration. In International Symposium on Mixed and Augmented Reality, October 2006.
- [16] POV-Ray, Persistence of Vision Raytracer. http://www.povray.org/ (last accessed in 04-07)
- [17] PRINCE, S., CHEOK, A., FARBIZ, F., WILLIAMSON, W., JOHNSON, N., BILLINGHURST, M. & KATO, H. 3d live: Real time captured content for mixed reality. In International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'02), pages 713, 2002.
- [18] SVOBODA, T., MARTINEC, D. & PAJDLA, T. A convenient multicamera selfcalibration for virtual environments. In Teleoperators and Virtual Environments, page 14(4), 2004.
- [20] TSAI, R. A versatile camera calibration technique for high-accurancy 3d machine vision metrology using off-the-shelf cameras and lenses. IEEE Journal of Robotics and Automation, 3(4):323 344, 1987.
- [21] VRML. Web3D Consortium. <u>http://www.web3d.org/</u> (last accessed in 04-07)
- [22] ZHANG, Z. A exible new technique for camera calibration. In IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, pages 13301334, 2000

# Dokumentation und 3D-Modellierung der Petroglyphen von Chichictara (Peru) mittels terrestrischem Laserscanning und Photogrammetrie

#### M. SAUERBIER<sup>1,</sup> P. FUX<sup>2</sup>, M. LINDSTAEDT<sup>3</sup>, T. KERSTEN<sup>3</sup>, J. PETERHANS<sup>1</sup> & M. BELKAÏD<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Etwa 400 km südöstlich von Lima und ca. 50 km landeinwärts der peruanischen Südküste nördlich der Ortschaft Palpa befindet sich in einem trockenen Seitenarm des Palpa-Tals der archäologische Fundort Chichictara. Hier wurden 66 mit eingepickten Zeichnungen (Petroglyphen) versehene Felsen entdeckt, die bis heute nicht komplett dokumentiert wurden. Um eine fundierte archäologische Analyse der Petroglyphen zu ermöglichen, führten im September 2006 der Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung der ETH Zürich, die HafenCity Universität Hamburg sowie die Abteilung für Ur- und Frühgeschichte der Universität Zürich eine gemeinsame Feldkampagne zur Erfassung der Petroglyphen mittels Photogrammetrie und terrestrischem Laserscanning durch. Ziel war einerseits die Erstellung eines hochgenauen digitalen Terrainmodells (DTM) des gesamten Tals (ca. 200m x 300m Ausdehnung) durch Laserscanning sowie andererseits die Erstellung detaillierter, texturierter 3D-Modelle der einzelnen mit Petroglyphen versehenen Steine mit anschließender Integration in das DTM. Die photogrammetrischen Bilder der Felsen wurden mittels einer digitalen Spiegelreflexkamera Canon D10 aufgenommen, während das Tal mit einem Laserscanner Trimble GS 200 erfasst wurde. Es werden die Methoden, die zur Bildorientierung und Modellierung der Felsen angewandt wurden, präsentiert und die erreichten Genauigkeiten kritisch analysiert. Weiter werden die Methodik zur Integration der einzelnen, beliebig orientierten 3D-Modelle der Felsen in das Laserscan-DTM mittels 3D-Transformation auf Basis identischer Punkte beschrieben und die geplanten archäologischen Analysen auf Basis des detaillierten 3D-Modells diskutiert. Abschließend werden die durchgeführten Arbeiten im Kontext des interdisziplinären Projektes Nasca/Palpa erläutert. Das Projekt wird von der Schweizerisch-Liechtensteinischen Stiftung für archäologische Forschungen im Ausland (SLSA) finanziert.

## 1 Einleitung

Seit nunmehr zehn Jahren finden in der weiteren Umgebung von Palpa bei Nasca in der südlichen Küstenregion Perus umfangreiche wissenschaftliche Forschungstätigkeiten statt. Die anfängliche Motivation dieser Aktivitäten war es, das Phänomen der bekannten prähistorischen Geoglyphen von Nasca und Palpa zu verstehen. Die von Menschenhand hergestellten, bis zu mehreren Kilometern langen geometrischen, zoomorphen und anthropomorphen Scharrbilder im Wüstenboden sollten in ihrem geografischen und kulturräumlichen Kontext dokumentiert werden, um ihre chronologische Stellung zu definieren und die damalige soziale Funktion interpretieren zu können. Die Geoglyphen werden den archäologisch definierten Kulturen

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> ETH Zürich, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, martin.sauerbier@geod.baug.ethz.ch

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Universität Zürich, Abteilung für Ur- und Frühgeschichte, peterfux@mac.com

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> HafenCity Universität Hamburg, Department Geomatik, [maren.lindstaedt, thomas.kersten]@hcu-hamburg.de

Paracas (800 – 200 v. Chr.) und Nasca (200 v. Chr. – 650 n. Chr.) zugeschrieben. Es war stets klar, dass der Archäologie natur- und ingenieurwissenschaftliche Disziplinen zur Seite stehen müssen, um die kulturellen Hinterlassenschaften sinnvoll erfassen und interpretieren zu können. In Palpa arbeiten daher u.a. Archäologen und Geomatikingenieure eng zusammen, um die kulturelle Entwicklung dieser Region umfänglich nachzuzeichnen (FUX, 2006).

Die prähistorischen Petroglyphen (in den Fels eingepickte Bilder) von Chichictara bei Palpa sind eine reiche Informationsquelle, auf deren eingehende Bearbeitung in der archäologischen Forschung nicht verzichtet werden kann. Ikonografisch können die Felsbilder in die Initial-(1800 – 800 v, Chr.) und Paracas-Zeit (800 – 200 v, Chr.) datiert werden. Die geometrischen, zoomorphen und anthropomorphen Bilder (Abb. 1), nicht zuletzt aber auch ganze Szenen aus dem Alltagsleben, sind Zeitfenster mit Ausblick auf längst vergangene Geschehnisse. Da die Petroglyphen ein künstlerischer Eingriff in die anstehende natürliche Umgebung sind, sollte der topografischen Situation erhebliches Mitspracherecht bei der Interpretation der ursprünglichen sozialen Bedeutung des Ortes und der Ikonografie der Bilder eingeräumt werden. Aus diesem Grund wurde der Fundort, ein seitliches Trockental des unteren Rio Palpa, mittels terrestrischem Laserscannig aufgenommen. Die 66 mit Petroglyphen versehenen Felsbrocken wurden mit Hilfe von photogrammetrischen Methoden dokumentiert. Daraus wird ein 3D-Modell des gesamten Fundortes Chichictara mit seinen Komponenten erstellt. Des Weiteren sollen GIS-basierte Analysen ikonografische Verbindungen mit anderen archäologischen Fundklassen, wie etwa Textilien und Keramik aus kontrollierten Grabungen oder Geoglyphen, evident machen - Steine beginnen über die Vergangenheit zu berichten.





Abbildung 1: Anthropomorphe, zoomorphe und geometrische Petroglyphen in Chichictara

## 2 Photogrammetrische 3D-Rekonstruktion der Petroglyphen

Die Dokumentation der Petroglyphen von Chichictara sollte im Gegensatz zu traditionellen Methoden der Felsbilddokumentation, die überwiegend auf 2D-Methoden (Zeichnungen, Fotografien, entzerrte Bilder) basieren, im 3D-Raum durchgeführt werden. Die Entscheidung, anstatt einer herkömmlichen 2D-Dokumentation dreidimensionale Modelle der Petroglyphen zu verwenden, entstand aufgrund verschiedener projekt-spezifischer Überlegungen. Einerseits sind die Petroglyphen in ihrem natürlichen Kontext dreidimensionale Objekte, andererseits war von Beginn an eine großräumige Analyse der Petroglyphen geplant, welche eine Einbettung der Petroglyphenmodelle in übergeordnete Geländemodelle erfordert. Diese Entscheidung ist insofern wichtig, als Petroglyphen an weiteren Fundstellen entdeckt wurden und somit in Verbindung mit übergeordneten Digitalen Geländemodellen die Datenbasis für GIS-basierte Analysen geschaffen werden soll.

#### 2.1 Bildaufnahme

Die Bildaufnahme wurde von Ende August bis Mitte Oktober 2006 in Chichictara, Peru, durchgeführt. Innerhalb von sechs Wochen wurden 66 mit Petroglyphen versehene Felsblöcke aufgenommen, jeweils abhängig von der Größe und Komplexität des Objektes mit einer Bildanzahl von 20 bis 80 Bildern pro Block bei einem Bildmassstab von circa 1:100. Die Aufnahmen wurden mit einer digitalen CMOS-Kamera Canon EOS 10D mit einem Bildformat von 3072 x 2048 Pixel gemacht. Um sicherzustellen, dass für die Bildorientierung genügend Verknüpfungspunkte effizient messbar waren, wurden die Felsblöcke mittels Spezialkleber mit ringförmigen Zielzeichen versehen. Zusätzlich wurden jeweils Maßstäbe aufgenommen, um eine Skalierung der nach relativer Orientierung entstandenen beliebig gelagerten und orientierten Koordinatensysteme zu ermöglichen. Die mit Petroglyphen bedeckten Felsen lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Während sich ein Großteil der Petroglyphen auf einzelnen Felsblöcken, die als Felssturz meist im Tal liegen, befindet, wurde ein zweiter Teil der Petroglyphen in die senkrecht stehende Felswand eingepickt. Aus dieser Situation ergeben sich zwei Aufnahmekonfigurationen. Die einzelnen, frei liegenden Felsblöcke wurden mit radialer Netzwerkkonfiguration aufgenommen, die an der Felswand befindlichen überwiegend durch genäherte Parallelaufnahmen. Aufgrund der Aufnahmekonfiguration (Bildmaßstab, Distanz zum Objekt, Basis) und der verwendeten Kamera lässt sich eine Genauigkeit der Einzelpunktmessung in X und Y (Lage) von etwa  $s_{x,v} \approx 0.8$  mm und in Aufnahmerichtung Z von  $s_z \approx 2$  mm erwarten (LUHMANN, 2000), vorausgesetzt dass gut definierte Verknüpfungspunkte auf der Felsoberfläche messbar sind.

#### 2.2 Bildorientierung

Die aufgenommenen Bilder werden zunächst innerhalb des Bildverbandes relativ zueinander orientiert. Hierzu werden die Bildpunkte unter Einsatz der Software PhotoModeler 5.0 manuell gemessen. Zusätzlich zu den signalisierten Punkten werden weitere markante Punkte als Verknüpfungspunkte auf den Felsoberflächen gemessen. Anschließend werden die Parameter der Bildorientierung und der Kamerakalibrierung simultan mittels Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung berechnet, d.h. neben der äußeren Orientierung werden die Koeffizienten K<sub>1</sub>,

 $K_2$ ,  $K_3$  der Objektivverzeichnung, die Koordinaten  $x_H$ ,  $y_H$  der Bildhauptpunkte, die Kamerakonstante c sowie die Bildweite W und die Bildhöhe H mit geschätzt.

Bei den sieben bisher fertig gestellten Bildverbände mit zehn Petroglyphen ergaben sich für die Standardabweichungen der Bildkoordinaten  $\sigma_{xy} = 0.9$  bis  $\sigma_{xy} = 3.2$  Pixel, was im Objektraum 0.7 bis 2.4mm entspricht. Der Großteil der Blöcke konnte mit Genauigkeiten von etwa einem Pixel orientiert werden; jedoch im Ausnahmefall konnte bei einem ungünstig geformten Fels, der die genaue Definition von Verknüpfungspunkten erschwerte, nur ein  $\sigma_{xy}$  von 2.4 Pixel erreicht werden.

#### 2.3 3D- Modellierung der Felsblöcke und Petroglyphen

Die 3D-Modellierung der Petroglyphen-Felsblöcke wird im Wesentlichen mittels zweier Methoden durchgeführt. Zum einen werden aktuell im Rahmen einer Diplomarbeit Untersuchungen zur automatischen Generierung der digitalen Oberflächenmodelle (DOM) der Felsen sowie der Petroglyphen mittels Matching durchgeführt, zum anderen werden vor allem Felsen mit geometrischer Form manuell modelliert. Möglich ist auch die Kombination beider Methoden, z.B. wenn das automatische Verfahren nur partiell gute Resultate ergibt. In diesem Fall können die Felsen manuell modelliert werden, um dann anschließend die automatisch generierten Oberflächenstücke in dieses Modell zu integrieren.

# 2.3.1 Automatische Oberflächengenerierung mittels Multiple Primitive Multi Image Matching

Die automatische Generierung von Oberflächen wird mittels der in der Gruppe Photogrammetrie und Fernerkundung der ETH Zürich entwickelten Software SAT-PP (Satellite Imagery Precision Processing) durchgeführt (ZHANG, 2005). Diese Software, ursprünglich für die Auswertung von Satellitenbildern entwickelt, ließ sich auch in der Nahbereichsphotogrammetrie bereits in verschiedenen Anwendungen erfolgreich einsetzen (REMONDINO & ZHANG, 2006).

Aufgrund der umfangreich vorliegenden Bilddaten wurde zur weitergehenden Automatisierung des Auswerteprozesses zunächst ein Python-Skript zur Erzeugung der SAT-PP-Projektdateien erstellt. Dieses Skript liest die benötigten Parameter aus der in PhotoModeler erzeugten Photo Table und speichert sie in den entsprechenden SAT-PP-Dateien ab. Somit können die Orientierungsdaten aller Bilder und Zusatzparameter automatisch nach SAT-PP überführt werden. Zusätzlich wird eine Batchdatei generiert, die ein Programm zur Wallis-Filterung zur lokalen Verbesserung von Kontrast und Helligkeit unter Beibehaltung der Kanten in den Bildern startet.

Zusammen mit den Bilddateien stehen somit alle benötigten Dateien für die Prozessierung in SAT-PP zur Verfügung. Im nächsten Schritt werden in SAT-PP Epipolarbilder inklusive Bildpyramiden erzeugt und anschließend im Stereomodus einige homologe Punkte manuell gemessen, die als Näherungs-DOM für das Matching benutzt werden. Nach der Definition von Masken, die in den beteiligten Bildern die beim Matching zu berücksichtigenden Regionen festlegen, kann der Matchingprozess gestartet werden. Es werden zunächst drei Merkmalsklassen extrahiert - markante Punkte, Rasterpunkte und Kanten - die dann im ersten Schritt je Bildpaar hierarchisch in den Bildpyramiden gematcht werden. Im zweiten Schritt werden diese Merkmale dann mittels Multi-Photo Geometrically Constrained Matching

(Z<sub>HANG</sub>, 2005) in allen beteiligten Bildern gematcht, wobei ein regelmäßiges Raster im Objektkoordinatensystem als Oberfläche generiert wird. Insbesondere aufgrund der 3D-Extraktion der Kanten eignet sich dieses Matchingverfahren für die Modellierung der Petroglyphen sehr gut, da diese bereits beim Matching erfasst werden (Abb. 2). Die Bildverbesserung mittels Wallis-Filter trägt zur Steigerung der Zuverlässigkeit der gematchten Punkte bei und resultiert in einer höheren Zahl gematchter Interestpunkte. Die Petroglyphen variieren in ihrer Breite zwischen etwa 0.5 cm und 1.5 cm und sind bis zu ca. 0.5 cm tief eingepickt.



Abbildung 2: Gematchte Interestpunkte, Rasterpunkte und Kanten am Beispiel einer Petroglyphe

Abbildung 3: Manuell modellierter Felsen mit Petroglyphen

#### 2.3.2 Manuelle 3D-Modellierung mit PhotoModeler

Die manuelle 3D-Modellierung wird ebenso wie die Bildorientierung mit dem photogrammetrischen Nahbereichs-Softwarepaket PhotoModeler durchgeführt. Hierzu werden die Felsoberflächen mittels räumlicher Dreiecke modelliert. Die so entstandenen 3D-Flächen werden anschließend automatisch texturiert, nachdem die Bilder in Photoshop radiometrisch angepasst wurden und die Zielzeichen zur besseren Visualisierung heraus retuschiert wurden (Abb. 3). Die manuelle 3D-Modellierung soll zukünftig für die geometrisch einfach geformten Felsen, die mit relativ wenig Messaufwand zu modellieren sind, angewandt werden.

#### 2.3.3 Zur Beurteilung der verwendeten Verfahren

Von einigen Petroglyphen wurden hoch auflösende Detailscans gemacht, die nun dazu dienen, beide Verfahren in puncto Genauigkeit zu vergleichen, was voraussichtlich im Rahmen einer Diplomarbeit an der HafenCity Universität Hamburg geschehen wird. Aufgrund der zeitlich begrenzten Verfügbarkeit des Laserscanners konnten allerdings nicht alle Petroglyphen im Detail gescannt werden. Die Modellierung der Petroglyphen mittels Photogrammetrie ist im Vergleich zur Aufnahme mit Laserscanning in Bezug auf die Auswertung aufwändiger. Zur Generierung der geometrischen Modelle mittels Monoplotting kann hoch auflösendes Laserscanning als effizientere Alternative zur Photogrammetrie betrachtet werden, jedoch sind orientierte Bilder als Zusatzinformation zur Digitalisierung für den Archäologen ein unerlässliches Werkzeug.

## 3 Erstellung eines Digitalen Geländemodells des Tals von Chichictara mittels terrestrischem Laserscanning

Für die Geländeaufnahme in Chichictara wurde der terrestrische Laserscanner MENSI GS200 der Firma Trimble eingesetzt. Der Scanner arbeitet mit der Methode des Impulslaufzeitverfahrens und garantiert so eine Reichweite von 200m und mehr. Die Messrate liegt unter realen Bedingungen zwischen 1000 und 2000 Punkten pro Sekunde, die Wellenlänge des Lasers beträgt 532nm. Um die Stromversorgung für Scanner und Notebook im freien Feld zu gewährleisten, wurde ein benzinbetriebener Generator mit einer Leistung von einem KW eingesetzt. Das Scannen diente in erster Linie der Erfassung des Tales, um die einzelnen Felsen mit den Steinzeichnungen im Kontext der Umgebung darstellen zu können. Die Dimensionen des Tales betrugen ca. 250m in der Länge, 130m in der Breite bei einer Höhendifferenz von ca. 70m zwischen Talboden und oberer Felskante. Untersuchungen zur Aufnahme digitaler Geländemodelle mittels terrestrischem Laserscanning wurden bereits 2004 am Beispiel einer Ringwallanlage erfolgreich durchgeführt (HÖNNIGER & KERSTEN, 2005).

Die Aufnahme in Chichictara wurde an insgesamt sechs Tagen von 13 freien Scannerstandpunkten durchgeführt. Für die Registrierung der Punktwolken wurden 14 Kugeln als Verknüpfungspunkte im Gelände verteilt und durch eine Netzmessung mit einem Leica TCA 700 in einem lokalen Koordinatensystem bestimmt. Die Standardabweichungen der 3D-Koordinaten lagen nach der Netzausgleichung im Mittel bei 6mm. Mit Hilfe der GPS-Messungen ließ sich das gesamte Netz in das UTM-System, in dem auch alle anderen räumlichen Daten des Projektes Nasca / Palpa vorliegen, transformieren.

Für das Scanning des Geländes wurde eine Auflösung von 15cm auf 100m gewählt. Dadurch war auch in größeren Entfernungen vom jeweiligen Standpunkt eine ausreichende Punktdichte von mindestens 50cm gegeben. Zusätzlich zur Erfassung des Geländes wurden noch hoch auflösende Scans einiger Petroglyphen gemacht, um diese Daten später exemplarisch mit den photogrammetrischen Daten vergleichen und auch kombinieren zu können. Dabei wurden hohe Auflösungen von 3mm und besser auf 10m gewählt. Insgesamt wurden 27 Mio. Punkte aufgenommen, was einer Datenmenge von 512MB entspricht.

Der erste Schritt der Datenauswertung war die Registrierung der Punktwolken, die von verschiedenen Scannerstandpunkten erfasst wurden. Alle Punktwolken, die am gleichen Tag aufgenommen wurden, wurden jeweils im Anschluss an die täglichen Feldarbeiten über die Verknüpfungspunkte zueinander registriert. Anschließend wurden jeweils diese Gruppen von zwei bis drei Standpunkten in ein gemeinsames, lokales Koordinatensystem transformiert. Die Genauigkeiten für die Registrierung lagen für alle Gruppen zwischen 1,5cm und 2,5cm, was für eine Geländemodellierung als ausreichend genau angesehen werden kann.

Im nächsten Schritt wurde ein digitales Geländemodell erstellt. Dafür wurde die Gesamtpunktwolke auf ca. 2 Mio. Punkte ausgedünnt, so dass der Punktabstand noch ca. 50 cm betrug. Dieser Abstand wurde als noch ausreichend erachtet, um das Tal mit all seinen wesentlichen Details modellieren zu können; eine höhere Punktdichte führt aufgrund der hohen Datenmenge zu Schwierigkeiten bei der Bearbeitung am PC und wegen der Geländecharakteristik zu einer unruhigen Geländedarstellung. Die Modellierung des Geländes wurde mit der Software Geomagic (Geomagic Inc.) durchgeführt, eine Darstellung des gesamten

Modells ist in Abb. 4 zu sehen. Für die spätere Visualisierung kann noch Textur z.B. aus ASTER-Satellitenbildern auf das 3D-Modell aufgebracht werden, für die Integration der ausgewerteten Steine genügt jedoch zunächst das reine Modell.



Abbildung 4: Ansicht des mit terrestrischem Laserscanning erzeugten DGM des Chichictara-Tals

## 4 Transformation der texturierten 3D-Modelle

Die Integration der zunächst beliebig im Raum orientierten - jedoch bereits texturierten - 3D-Modelle der einzelnen Felsen und Felskomplexe in das Gesamtmodell mittels der durchgeführten GPS-Messungen stellte sich aufgrund der durch Abschattungen bedingten schlechten Genauigkeiten von 1m und mehr als relativ ungenaue Methode heraus. Daher wurde entschieden, die genaue Positionierung über identische Punkte im Laserscanning-DGM und den photogrammetrisch generierten Einzelmodellen durchzuführen. Die dafür durchzuführende Transformation der vorliegenden texturierten 3D-Modelle der Felsen soll in Geomagic Studio 9 durchgeführt werden, wobei beachtet werden muss, dass sowohl die Texturkoordinaten als auch die Geometrie korrekt transformiert werden. Die Transformation kann in Geomagic über gemeinsame Punkte durchgeführt werden, die in den photogrammetrisch erzeugten Modellen und dem Laserscanning-DTM manuell gemessen werden müssen. Dieses Verfahren wird derzeit im Rahmen einer Diplomarbeit an der ETH Zürich untersucht.

Sobald das kombinierte 3D-Modell vorliegt, sollen archäologische und räumliche Daten in das an der ETH Zürich in Zusammenarbeit mit dem DAI (Deutsches Archäologisches Institut, Bonn) erstellte Nasca-GIS, welches zur Analyse der Geoglyphen der Nasca/Palpa-Region dient (LAMBERS & SAUERBIER, 2003), integriert werden. Damit können vor allem bisher nur vermutete ikonografische Zusammenhänge zwischen Geo- und Petroglyphen fundiert untersucht werden.
Im Hinblick auf die ikonografische Auswertung der Petroglyphen wird außerdem ein 3D-Messtool entwickelt, welches den Archäologen eine intuitive und effiziente Möglichkeit der dreidimensionalen Digitalisierung der Petroglyphen auf Basis der texturierten 3D-Modelle mittels Monoplotting erlauben soll.

## 5 Fazit und Ausblick

Die Petroglyphen von Chichictara und das Trockental konnten durch den Einsatz von Photogrammetrie und terrestrischem Laserscanning effizient erfasst und dokumentiert werden. Terrestrisches Laserscanning erwies sich mangels Eignung von Satellitenbildern und Verfügbarkeit geeigneter Luftbilder als einzige Möglichkeit, das Tal mit dem gewünschten Detailreichtum und hoher Genauigkeit zu erfassen. Mit dem hoch aufgelösten Laserscanning-DTM steht eine wertvolle Datenbasis für weitere Analysen der Petroglyphen in ihrem räumlichen Kontext zur Verfügung. Geplant ist vor allem eine Sichtbarkeitsanalyse der Petroglyphen und der Ikonografie. Die Bildorientierung und 3D-Modellierung der Felsen ist derzeit in Bearbeitung, mit der Digitalisierung der Petroglyphen soll in Kürze begonnen werden.

## 6 Dank

Die Autoren danken der SLSA (Schweizerisch-Li echtensteinische Stiftung für archäologische Forschungen im Ausland) für die Finanzierung des Projektes. Außerdem gilt besonderer Dank der Kommission für Archäologie Außereuropä ischer Kulturen (KAAK) des Deutschen Archäologischen Instituts (DAI) in Bonn für die Unterstützung in Palpa / Peru.

## 7 Literaturverzeichnis

- FUX, P., 2006: Das Petroglyphen-Projekt «Chichictara» in Palpa, Peru. Feldarbeiten im Jahr 2006 und Ausblick. Jahresbericht der Schweizerisch-Liechtensteinischen Stiftung für Archäologische Forschungen im Ausland 2006. Zürich, in Druck.
- HÖNNIGER, C. & KERSTEN, TH., 2005: Topografische Aufnahme der sächsischen Ringwallanlage Willenscharen mit dem 3D-Laserscanning-System GS100 von Mensi. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 224-231.
- LAMBERS, K. & SAUERBIER, M., 2003: A data model for a GIS-based analysis of the Nasca lines at Palpa, Peru. IAPRS, Vol. XXXIV-5/C15, pp. 713-718.
- LUHMANN, T., 2000: Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, ISBN 3-87907-321-X.
- REMONDINO, F. & ZHANG, L., 2006: Surface reconstruction algorithms for detailed close-range object modeling. IAPRS, Vol. XXXVI, part 3, pp. 117-123.
- ZHANG, L., 2005: Automatic Digital Surface Model (DSM) generation from linear array images. PhD Thesis Nr. 16078, Institut f
  ür Geod
  äsie und Photogrammetrie, ETH Z
  ürich, 199 S.

# **3D-Dokumentation des Essener Domschatzes**

LENA BANGE<sup>1</sup>, JÜRGEN PEIPE<sup>2</sup> & HEINZ-JÜRGEN PRZYBILLA<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Der Essener Domschatz enthält eine der wichtigsten Sammlungen mittelalterlicher religiöser Kunst in Deutschland. Er besteht aus etwa 250 Einzelobjekten wie Kreuzen, Schwertern, Kronen, Skulpturen, Manuskripten und Reliquiarien. Diese Kunstwerke sind aus den verschiedensten Materialien hergestellt und sehr unterschiedlich in ihrer Größe, Form und Komplexität. Ihre Erfassung und Modellierung ist eine anspruchsvolle und schwierige Aufgabe. Zum Einsatz kommen optische Messmethoden wie Photogrammetrie, Laserscanning und Streifenprojektionsverfahren. Im Bericht wird der Stand des Projekts aufgezeigt: Die eingesetzten Messsysteme werden beschrieben, Kalibrieraspekte, Genauigkeitsmaße und auftretende Probleme werden genannt, und es werden Ergebnisse, d.h. aufgenommene und modellierte Objekte, vorgestellt.

#### 1 Motivation

Bekanntlich besteht weltweit großer Bedarf an der Erfassung und Dokumentation historischer Kunstobjekte und Ensembles. Neben anderen Methoden können hierfür optische Messtechniken wie Photogrammetrie, Laserscanning und Streifenprojektionsverfahren vorteilhaft eingesetzt werden. Als Beispiel für deren Anwendung wird im Folgenden über die laufenden Arbeiten zur Dokumentation des Essener Domschatzes berichtet.

Die im Dommuseum von Essen zusammengefassten Kunstobjekte bilden eine der wenigen Sammlungen mittelalterlicher religiöser Kunst, die den Lauf der Jahrhunderte weitgehend unbeschadet überstanden haben. Unter den etwa 250 Werken – Kreuze, Schwerter, Kronen, Skulpturen, Manuskripte, Reliquiarien etc. – sind Objekte aus der Ottonischen Epoche von besonderer Bedeutung, z. B. die Otto III. zugeschriebene goldene Kinderkrone, das Theophanu-Evangeliar (ein reich verziertes Manuskript aus dem 11. Jahrhundert) und die berühmte Goldene Madonna, die weltweit älteste bekannte Marienfigur (siehe auch Abb. 1 und 2).

Es ist geplant, die wichtigsten Kunstwerke des Domschatzes virtuell zu rekonstruieren und in einem digitalen 3D-Archiv unterschiedlichen Anwendern verfügbar zu machen. In den folgenden Kapiteln werden die eingesetzten Messsysteme mit ihren technischen Spezifikationen genannt, auf Kalibrieraspekte und Schwierigkeiten bei der Objekterfassung wird eingegangen, und es wird der Stand des Projekts erläutert.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Lena Bange & Heinz-Jürgen Przybilla, Fachhochschule Bochum, Fachbereich Vermessungswesen und Geoinformatik, e-mail: heinz-juergen.przybilla@fh-bochum.de

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Jürgen Peipe, Universität der Bundeswehr München, Institut für Photogrammetrie und Kartographie, e-mail: j-k.peipe@unibw-muenchen.de



Abbildung 1: Otto-Mathilden-Kreuz, Prozessionskreuz aus dem 10. Jahrhundert, aus diversen Materialien, 44.5 cm hoch, 29.5 cm breit. © Martin Engelbrecht



Abbildung 2: Kinderkrone für Otto III. aus dem 10. Jahrhundert, aus diversen Materialien, z. B. Goldblech, Edelsteinen, Perlen. © Martin Engelbrecht



Abbildung 3: Streifenprojektionssystem

### 2 Messsysteme

Als Messwerkzeuge zur geometrischen 3D-Erfassung der Essener Kunstwerke werden hauptsächlich Streifenprojektionssysteme benutzt – zu Beginn des Projekts ein Breuckmann optoTOP HE-600, das zur Digitalisierung der Goldenen Madonna eingesetzt wurde (PEIPE & PRZYBILLA 2005), und seitdem ein Breuckmann triTOS (Abb. 3; BREUCKMANN 2007) zur Aufnahme weiterer Teile des Domschatzes. Letzteres – ein System mittlerer Genauigkeit, die vom Hersteller mit ca. 0.1 - 0.2 mm bei flächenhafter Messung angegeben wird – besteht aus einer mechanisch stabilen Basis, an deren Enden je eine 1.3 Megapixel Kamera und ein Streifenlichtprojektor angebracht sind. Der Triangulationswinkel beträgt 20 Grad. Unterschiedliche Basislängen und Objektive ermöglichen die Aufnahme unterschiedlich großer Objektbereiche (Tab. 1).

Sensorname (Type, #, base length ("Lxx") and FOV diagonal [mm]	Field of view Width X x Height Y / Depth Z [mm]	Projector lens (f[mm])	Camera lens (f[mm])	Aperture of Projector lens	Aperture of Camera lens	Working distance [mm] (Base front – Sensor zero point)
TT685-HE-L050-175	140 x 100 / 90	P17 (12 mm)	C17 (23 mm)	2.8	5.6	390
TT685-HE-L300-325	260 x190 / 180	P32	C32	2	2.8-4	1070
		(17 mm)	(35 mm)			
TT685-HE-L300-675	560 x 410 / 300	P67	C67	1.4-2	2-2.8	1085
		(8 mm)	(17 mm)			

Tab. 1: Konfigurationsmöglichkeiten des Breuckmann Streifenprojektionssystems

Auf die Kalibrierung und Genauigkeitsmaße des triTOS-Systems wurde in BANGE et al. (2007) eingegangen. Dort finden sich auch Handhabungshinweise (Länge der Aufwärmphase, mehrfache Durchführung von Kalibriermessungen zur Feststellung der Messbereitschaft etc.).

Die Modellierung der virtuellen Kunstwerke des Domschatzes erfolgt zunächst innerhalb der triTOS Geräte-Software, die anschließende Texturierung und Visualisierung mit Hilfe der Programmpakete RapidForm und Geomagic (INUS 2007, GEOMAGIC 2007). Information für das Aufbringen der Textur liefern Farbaufnahmen mit einer Nikon D2Xs. Im Übrigen soll darauf hingewiesen werden, dass die Vielzahl von 3D-Punktwolken, die mit einem Streifenprojektionssystem erhalten werden, genauigkeitsfördernd mit Hilfe photogrammetrisch bestimmter Referenzpunkte zusammengefügt werden können.

Zu den bisher genannten Messsystemen wird ein Laserscanner hinzukommen. Es handelt sich um den MicroScan Lasersensor, befestigt am MicroScribe Messarm (RSI 2007). Dieses Gerät wird zur Zeit kalibriert und getestet, und wird demnächst bei der Erfassung der Objekte des Essener Domschatzes zum Einsatz kommen.

## 3 Objektaufnahme

Nach einer Testphase, in der – wie erwähnt – ein 3D-Modell der Goldenen Madonna erzeugt wurde (PEIPE & PRZYBILLA 2005) wurden im nächsten Arbeitsabschnitt die folgenden Kunstwerke aufgenommen (Abb. 4):

- Die Elfenbeinpyxis ist eine Dose, in der vermutlich früher Weihrauch aufbewahrt wurde. Sie hat einen elliptischen Grundriss mit 10.4 cm bzw. 12.5 cm Durchmesser und eine Höhe von 8.8 cm. Außen ist die Geburt Christi und die Verkündigung an die Hirten in einer Schnitzerei dargestellt. Sie wurde im 5./6. Jahrhundert im östlichen Mittelmeerraum aus dem leicht ovalen Wurzelbereich des Stoßzahns eines Elefanten hergestellt.
- Der Ludgeruskelch wurde im 10. Jahrhundert im Nordwesten des damaligen Reichs erstellt. Er ist 12.2 cm hoch und seine Kuppa (oberer Teil des Kelchs) hat einen Durchmesser von 7 cm. Der aus Kupfer gegossene und vergoldete Kelch ist am Fuß und am oberen Rande der Kuppa mit lateinischen Inschriften versehen. Die Inschriften reichen jeweils genau einmal um den Kelch herum.
- Das Zeremonialschwert der Äbtissinnen des Damenstifts Essen, häufig auch als Richtschwert der Heiligen Cosmas und Damian bezeichnet, stammt aus der Zeit der Ottonen und wurde wahrscheinlich 993 von Kaiser Otto III. dem Damenstift Essen geschenkt. Die Schwertscheide – das eigentliche Messobjekt – besteht im Innern aus Obstbaumholz und ist vollkommen mit Goldplatten besetzt. Diese Goldplatten sind auf Vorder- und Rückseite mit Ranken verziert, in denen bei genauerer Betrachtung teilweise Tiere erkannt werden können. Die Gesamtlänge des Schwertes beträgt ca. 94 cm.





Abbildung 4 : Elfenbeinpyxis (oben), Ludgeruskelch (li.), Zeremonialschwert (re.)

Die Objekterfassung mit dem Streifenprojektionssystem lässt sich in verschiedene Arbeitsschritte gliedern. In Abhängigkeit von Objektgröße und -form ist der Sensor geeignet zu konfigurieren (Tab. 1). Nach der Aufwärmphase des Systems erfolgt – vor der eigentlichen Messung – eine Systemkalibrierung. Nach deren erfolgreichem Abschluss ist das System messbereit. Nachfolgend werden die einzelnen Objektscans erfasst. In der Regel bietet es sich an, die Verknüpfung

der Teilscans unmittelbar nach ihrer Erfassung durchzuführen. Somit ist gewährleistet, dass eine hinreichende Überlappung der Punktwolken vorliegt. Ausgehend von zu markierenden identischen Objektbereichen erfolgt die Verknüpfung der Scans auf Basis eines konfigurierbaren ICP-Algorithmus (Abb. 5).



Abbildung 5: Markierung der Teilscans mit "Fähnchen" als Vorbereitung einer ICP-Verknüpfung (li); verknüpfte Einzelmodelle (re.).

Die Werke des Essener Domschatzes weisen sehr unterschiedliche Größe, Oberflächenstruktur und Materialien auf. Entsprechend aufwändig gestaltet sich die Messaufnahme, insbesondere führt dies zu einer erhöhten Anzahl von Scans, sowie Schwierigkeiten bei deren Verknüpfung. Besondere Probleme bereiten:

- Glänzende Materialien wie Gold, insbesondere im Hinblick auf auftretende Reflektionen
- Edelsteine (Glaskörper), da diese in der Regel von den Projektionsmustern "durchdrungen" werden
- Die hohe Komplexität von Oberflächen, einschließlich Hinterschneidungen und Verdeckungen
- Die Verknüpfung von Objekten, die sich aus zwei Seiten zusammensetzen (z. B. das Zeremonialschwert) und somit quasi in zwei Teilobjekte zerfallen

Unter Berücksichtigung der oben genannten Problemstellungen ergaben sich für die drei aktuell erfassten Objekte die in Abbildung 6 und Tabelle 2 aufgeführten Aufnahmesituationen. Dabei ist der örtliche Aufwand für jedes der Objekte mit ca. einem Arbeitstag anzusetzen. Die für eine erfolgreiche Objekttexturierung anzufertigenden Fotos beanspruchen einen zeitlichen Rahmen von weiteren 4 - 8 Stunden.

Für die Messung der Pyxis und des Kelches konnte ein Drehteller vorteilhaft genutzt werden. Hingegen musste das Schwert auf dem Boden liegend gemessen werden, so dass der Sensor über diesem positioniert werden musste. Die Erfassung des Schwertes von der Seite führte zu keinen befriedigenden Ergebnissen, da sich die digitalisierten Punktwolken auf Grund zu geringer Ausdehnung als ungeeignet für eine Verknüpfung darstellten.





Abbildung 6: Objektaufnahme mit dem triTOS-Sensor

	Elfenbeinpyxis	Ludgeruskelch	Zeremonialschwert
Sensorbasis	50 mm	50 mm	300 mm
Aufnahmeentfernung	ca. 400 mm	ca. 400 mm	ca. 1000 mm
Erfassungstiefe	90 mm	90 mm	180 mm
Fester Sensorstandort, Messobjekt auf Drehteller	ja	ja	nein
Anzahl der Scans	35	50	35 pro Seite
Erfassungsdauer	8 h	5 h	7 h
Verknüpfung der Scans mit- tels ICP-Algorithmus	während der örtl. Erfassung	zusätzlich 5 h	zusätzlich 5 h

#### Tabelle 2: Aufnahmeparameter







Abbildung 7: Nachbearbeitung durch Füllen von Löchern (links) und Smoothing (Mitte und rechts)

### 4 Nachbearbeitung der 3D-Punktwolken

Die Nachbearbeitung der Daten dient dazu, Datenmengen zu reduzieren, Löcher zu füllen, die Oberflächen zu bearbeiten (zu glätten) und Texturen aufzubringen (Abb. 7). Diesbezüglich grundsätzlich geeignete Funktionalitäten bieten Programmsysteme wie z. B. RapidForm und Geomagic. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass diese Systeme ihre Nutzungsschwerpunkte eher in der industriellen Anwendung finden und dementsprechend ausgelegt sind. Kunsthistorische Objekte, wie in den vorliegenden Beispielen mit zum Teil sehr filigranen Oberflächen, führen derartige Systeme an ihre Leistungsgrenzen. Die derzeit vorliegenden Erfahrungen mit dem Rapidform Paket lassen viele Fragen offen, insbesondere zur Parametrisierung der vielfältigen Tools zur Daten-Manipulation. Häufiges "trial and error" ist gefragt, manches Mal führt ein eher zufällig gewählter Ansatz zum gewünschten Ziel. Die Funktionalitäten zur Objekttexturierung sind davon gleichfalls betroffen. Bei allen drei Objekten erwies sich das Ergebnis der Texturierung als verbesserungswürdig.

Das Texturieren der Pyxis war insofern relativ schwierig, da sie eine sehr ausgeprägte Oberflächenstruktur besitzt und deshalb sehr viele Passpunkte für die Bild-Objektzuweisung benötigt werden. Obwohl nur eine Textur auf das gesamte Objekt aufgelegt wurde (siehe Abb. 4), bei der es eigentlich keine Überschneidungen geben sollte, entstanden weiße Flecken auf der Oberfläche. Diese zeigen Stellen an denen keine Farbinformation enthalten ist. In der aufgelegten Textur gab es jedoch keine Bereiche ohne Farbinformationen. Dieses Problem trat auch bei den übrigen Objekten auf. Es ist demnach weniger ein Problem der Oberflächenstruktur als ein Problem des implementierten Algorithmus. Diesbezüglich sind weitere Untersuchungen notwendig.



Abbildung 8: Elfenbeinpyxis mit Textur

## 5 Fazit und Ausblick

Das Streifenprojektionssystem triTOS hat seine Eignung für die Dokumentation der im Rahmen dieser Arbeit erfassten kunsthistorischen Objekte bewiesen. Die geometrische Erfassung konnte trotz unterschiedlicher Oberflächengestaltung weitestgehend vollständig erfolgen. Die Messung der Pyxis war problemlos durchführbar, da diese für das Messsystem geeignete Oberflächenei-

genschaften aufweist (die Oberfläche ist matt und hell). Probleme gab es vor allem im Inneren und im Bereich der Hütte, da diese hohl geschnitzt ist und somit nicht von ihrer Innenseite her erfasst werden konnte. Die Gesichter der Figuren sind in den meisten Fällen sehr gut zu erkennen. Der Ludgeruskelch verursachte deutlich höheren Messaufwand. Wegen der vergoldeten Oberfläche gab es starke Reflektionen, wodurch immer nur sehr kleine Bereiche des Objektes erfasst werden konnten (ca. 2 cm breite Streifen). Infolgedessen gab es auch Probleme bei der Verknüpfung, was auf die kaum vorhandene Struktur der Oberfläche zurückzuführen ist. Das Zeremonialschwert erwies sich von der Ober- und Unterseite als gut messbar.

Dringend notwendig sind Untersuchungen zur Weiterverarbeitung der Punktwolken. Die Qualität der Dokumentation – insbesondere in visueller Hinsicht – ist hiervon wesentlich abhängig.

Grundsätzlich dient die Digitalisierung der Kunstwerke des Essener Domschatzes der Unterstützung der Museumsfachleute bei ihrer Arbeit als Forscher und Bewahrer des kulturellen Erbes. Dies umfasst kunsthistorische Studien ebenso wie die Reparatur/Restaurierung einzelner Werke. Darüber hinaus ist geplant, die Ergebnisse der Vermessungen auch den nicht-professionellen Besuchern des Museums zugänglich zu machen - ein virtuelles Museum des Domschatzes soll eingerichtet werden.

#### 6 Literaturverzeichnis

- BANGE, L., 2007: Untersuchungungen eines Streifenprojektionssystems zur Dokumentation kunsthistorischer Objekte, Diplomarbeit FH Bochum (unveröffentlicht)
- BANGE, L., PEIPE, J. & PRZYBILLA, H.-J., 2007: Genauigkeitsmaße eines Streifenprojektionssystems zur 3D-Objekterfassung. In: Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Oldenburger 3D-Tage 2007, Wichmann, Heidelberg (im Druck)

BREUCKMANN, 2007: Produktinformation optoTop & triTOS. <u>www.breuckmann.com</u> (27.04.07) GEOMAGIC, 2007: Produktinformation Geomagic. www.geomagic.com (27.04.07)

- INUS TECHNOLOGY, 2007: Produktinformation Rapidform. www.rapidform.com (27.04.07)
- PEIPE, J. & PRZYBILLA, H.-J.: Modeling the Golden Madonna. In: Proc. CIPA 2005 XX Int. Symposium, Turin/Italien, ISSN 1682-1777, 934-936
- RSI GmbH: Produktinformation MicroScribe und MicroScan. <u>www.rsi-gmbh.de</u> und <u>www.microscan-3d.com</u> (27.04.07)

# **Mobile Photogrammetry**

#### ARMIN GRUEN<sup>1</sup> & DEVRIM AKCA<sup>1</sup>

Abstract: This paper examines the potential of mobile phones to be used as a front-end sensor for photogrammetric procedures and applications. For this purpose we are currently calibrating various mobile phones over our indoor 3D testfield, using self-calibration. In some systems we have diagnosed substantial systematic errors. We are currently also in the process of checking the stability of the interior orientation over time.

Using the same testfield we are performing accuracy tests in order to evaluate the metric performance. This paper reports about first experiences in calibration and accuracy validation of mobile phone cameras. We believe that with a proper performance these devices can be used for many photogrammetric tasks in the future.

### 1 Introduction

With the availability of very affordable and good resolution CCD/CMOS cameras and other offthe-shelf devices, including compact computers (of laptop type) the potential of building efficient mobile, low-cost, high-performance systems has substantially improved. Among various hardware and software components mobile phones constitute an interesting component for image data acquisition for obvious reasons: They are very inexpensive, light and handy and have CMOS cameras integrated of currently up to 10 Mpixels image format.

Their usability for many applications has recently been realized. One of the most prominent applications is the character/text recognition in a flexible and portable fashion (WATANABE et al., 2003; KOGA et al., 2005; PARIKH, 2005). ROHS (2004) realizes a scenario where camera phones are used to recognize the visual codes in the scene. By recognizing a code tag, the device determines the code value, the targeted object or image element. The phone's wireless communication channel is used to retrieve online content related to the selected image area or to trigger actions based on the sensed code.

As a facial animation study for mobile phones, RIEGEL (2005) creates a specific 2D head model using the generic 3D MPEG-4 face and portrait images. The model is animated via voice or text. AL-BAKER et al. (2005) uses a GPRS and WAP enabled PDA or mobile phone for human face identification. The system allows the user to send an image of a human face, acquired through a mobile phone with a built-in camera, to remotely perform automatic face recognition. The user will then instantly receive details of the person, if a match is found. The system can be useful especially for the instant face identification and authentication tasks.

CLEMENS et al. (2005) develop a panoramic image application suit for handy cameras. The image stitching is carried out in real-time. PITTORE et al. (2005) implement an image-based context awareness engine specifically for archeological sites and museums. Visitors can "ask" information about an unknown monument by simply taking a picture of it with a camera integrated mobile phone and send it to the system for recognition. UEDA et al. (2004) use mobile phones, equipped with a camera and a GPS chip, as a content provider to a Geographical

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland, <u>www.photogrammetry.ethz.ch</u>

Information System (GIS). Users can annotate objects in the environment by sending text, picture and location information via mobile phone to a central data base.

CHUNG et al. (2004) correct the radial lens distortion of a mobile phone camera applying a calibration procedure from LENZ & TSAI (1988). However, their experiment lacks numerical results and analysis. In spite of the availability of a broad diversity of applications, the metric capabilities and characteristics of mobile phone cameras have not been investigated so far.

In 2004, Sharp Corporation developed a 2 Mpixel CCD camera module with 2X optical zoom and auto-focus function (Figure 1a) intended for use in mobile phones (PHYSORG, 2004). In 2005, they released two new camera modules (Figure 1b) with a 3 Mpixel CCD chip (PHYSORG, 2005). One year after, Samsung announced a 10 Mpixel camera phone (Figure 1c) at CeBIT exhibition in Hannover (WILLIAMS, 2006). These examples show the rapid progress in the technology of mobile phone cameras.



Figure 1: (a) Sharp's 2 Mpixel CCD camera module LZP0P3738, (b) Sharp's 3 Mpixel CCD camera modules LZ0P3751 and LZ0P3758, (c) Samsung's 10 Mpixel camera integrated handy SCH-B600.

Due to very limited size and restricted material and equipment costs, the production of mobile phone cameras is a challenge (MYUNG-JIN, 2005; CHOWDHURY et al., 2005). The impact of their production specifications on the stability of interior orientation and 3D object reconstruction capabilities has not adequately been studied in the literature. This work investigates the accuracy potential of two recent mobile phone cameras and compares them with respect to two off-the-shelf digital still video cameras.

The next chapter introduces the cameras and the calibration/validation testfield. The third chapter gives the results of the accuracy test for all four cameras and a test, which analyses the effect of JPEG compression. The fourth chapter discusses the results.

### 2 Cameras and the testfield

#### 2.1 Cameras

Four cameras are used (Figure 2). Two of them are mobile phone cameras (Sony Ericsson K750i and Nokia N93) and two of them are off-the-shelf digital still video cameras (Sony DSC W100 and Sony DSC F828). The mobile phone cameras have CMOS sensors of smaller size than the CCD chips in the off-the-shelf cameras and partly much smaller lenses. The technical specifications of all four cameras are given in Table 1.



Figure 2: Cameras used in our tests: (a) Sony Ericsson K750i, (b) Nokia N93, (c) Sony DSC W100, (d) Sony DSC F828.

	K750i	N93	W100	F828	
Sensor	CMOS	CMOS	CCD	CCD	
	1/3.2"	1/3.2"	1/1.8"	2/3"	
	4.5 x 3.4 mm	4.5 x 3.4 mm	7.2 x 5.3 mm	8.8 x 6.6 mm	
Pixel size	2.8 micron	2.2 micron	2.2 micron	2.7 micron	
Image format	1632 x 1224	2048 x 1536	3264 x 2448	3264 x 2448	
-	2 Mpixel	3.2 Mpixel	8 Mpixel	8 Mpixel	
Lens	No information	Carl Zeiss	Carl Zeiss	Carl Zeiss T	
		Vario-Tessar	Vario-Tessar	Vario-Sonnar	
Focal length	4.8 mm	4.5 – 12.4 mm	7.9 – 23.7 mm	7.1 – 51.0 mm	
Optical zoom	No	3X	3X	7X	
Auto focus	Yes	Yes	Yes	Yes	
Aperture	F2.8 (fixed)	F3.3 (fixed)	F2.8 – 5.2	F2.0 – 8.0	
Output format	Only JPEG	Only JPEG	Only JPEG	JPEG and TIFF	

Table 1: Technical specifications of the cameras.

#### 2.2 Testfield



Figure 3: The 3D testfield and the Axyz system.

The photogrammetric calibration field at the Institute of Geodesy and Photogrammetry (HIL C57.3, ETH Zurich) was used. It is  $3.4 \times 2.0 \times 1.0 \text{ m}^3$  in size. The 3D coordinates of 87 well distributed control points (GCP) were measured using a Leica Axyz system. The Leica Axyz system consists of two Leica total stations (TC 3000 and TC 2002) and one processing computer unit, which is connected to them. After an initialization step, two operators simultaneously measure the vertical angles and horizontal directions of the targeted point. The system calculates the 3D coordinates (by spatial intersection) and the precision values in real-time. The scale of the object space was given by measuring a bar whose length was accurately defined by interferometry. The average precision values of the GCPs are  $\pm 0.03$ ,  $\pm 0.05$  and  $\pm 0.03$  mm for X, Y and Z axes, respectively.

#### 3 Accuracy tests

For the calibration of the K750i, eighteen images from three locations (each of which has three stations, i.e., down, middle and up) were taken in a convergent geometry mode (Figure 4a). Nine images are taken in normal mode (image no. 1-9) and each three of the rest nine images are  $-90^{0}$  (image no. 10-12),  $+90^{0}$  (image no. 13-15) and  $180^{0}$  (image no. 16-18) rotated, respectively.



Figure 4: (a) Image acquisition geometry for the calibration of K750i, and (b) for N93, W100 and F828. Black circles stand for the image stations.

For the calibration of the N93, W100 and F828 cameras an image acquisition geometry with thirteen images (Figure 4b) was used. Images no. 1-9 are in normal mode and no. 10-13 are the rotated ones. However, different rotated image versions were used. For the camera N93 the images no. 10 and 11 are  $-90^{0}$  and no. 12 and 13 are  $+90^{0}$  rotated, for W100 no. 10-13 are all  $+90^{0}$  rotated, and for F828 no. 11 and 13 are  $-90^{0}$  and no. 10 and 12 are  $+90^{0}$  rotated.

The image measurements were performed with the Least Squares template matching (GRUEN, 1985) using the in-house developed software BAAP. Another in-house developed software SGAP (BEYER, 1992) was used for the bundle block adjustment with self-calibration.



Figure 5: Image quality of the cameras. (a), (b), (c) and (d) are cropped images at station 4 from K750i, N93, W100 and F828, respectively. The signalized point approximately locates at the centre of the image. Image scales are 1/863, 1/829, 1/460 and 1/513 for (a), (b), (c) and (d), respectively. (e), (f), (g) and (h) are cropped images at station 1 from K750i, N93, W100 and F828, respectively. The signalized point approximately locates at the upper left part of the full image. Image scales are 1/977, 1/961, 1/550 and 1/583 for (e), (f), (g) and (h), respectively.



Figure 6: 3X zoom-in of the upper left part of Figure 5f. JPEG artifacts are visible.

The imaging quality differs among the cameras. In Figure 5a, 5b and 5c, low-level image enhancement effects are strongly visible at the edges of the points. The F828 has the best overall image quality considering all images from all stations. On N93 images (Figure 5b and 5f) strong JPEG artifacts are visible (Figure 6).

The K750i, N93 and W100 have only the JPEG output option. Their image measurements were carried out on their original JPEG images. For the F828, TIFF output images were used for the image measurements.

#### 3.1 Accuracy test of K750i

The 18 images version gives a sigma0 value of about half a pixel (version 10 in Table 2) and highly systematic residual

patterns at some images (Figure 7, 1. row), even after self-calibrating bundle adjustment with block-invariant additional parameters.

The six most deteriorated images among the rotated ones were then excluded (images no. 11, 12, 13, 14, 16 and 18). These reduced twelve images versions (versions 11, 12, 13, 14 and 15 in Table 2) give better sigma0 and precision values. However, a systematic pattern of the image coordinate residuals still remains, varying from image to image. Note that version 15 stands for the free network adjustment.

Ver	GCP	СНК	TIE	APs	Rej	Sigma0	STD-X	STD-Y	STD-Z	RMSE-X	RMSE-Y	RMSE-Z
						(µm)	of CHK-	+TIE poin	ts (mm)	at CHK points (mm)		
						(pixel)	of only	GCP poin	ts (mm)	at G	CP points (	mm)
10	87	0	90	10	0	1.20	0.291	0.558	0.251	N.A.	N.A.	N.A.
						0.43	0.109	0.182	0.107	0.086	0.125	0.053
11	87	0	80	10	26 <sup>(1)</sup>	0.65	0.187	0.307	0.161	N.A.	N.A.	N.A.
						0.23	0.026	0.039	0.026	0.006	0.008	0.005
12	87	0	80	44	26 <sup>(1)</sup>	0.64	0.185	0.304	0.159	N.A.	N.A.	N.A.
						0.23	0.025	0.038	0.025	0.006	0.008	0.005
13	44	43	80	10	25 <sup>(1)</sup>	0.64	0.188	0.312	0.163	0.280	0.498	0.201
						0.23	0.025	0.038	0.025	0.007	0.010	0.006
14	10	77	80	10	27 <sup>(1)</sup>	0.61	0.196	0.318	0.173	0.499	1.048	0.501
						0.22	0.024	0.036	0.024	0.008	0.012	0.005
15	167			10	30 <sup>(1)</sup>	0.59	0.174	0.283	0.151	N.A.	N.A.	N.A.
	free					0.21	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

#### Table 2: Absolute accuracy test of K750i.

Ver	: Version number
GCP/CHK/TIE	: Number of control points / independent check points / tie points, respectively
APs	: Number of additional parameters
Rej	: Rejected rays by data-snooping, rejection rule for <sup>(1)</sup> : reject all residuals >= 4xSigma0
Sigma0	: Standard deviation of image observations a posteriori
STD	: Average theoretical precision values of CHK/TIE/GCP coordinates
RMSE	: Empirical accuracies of CHK/GCP coordinates.



Figure 7: Systematic residual patterns after self-calibrating bundle adjustment.

After Brown's 10 additional parameter set, GRUEN'S (1978) 44 additional parameter set was applied. The block-invariant 44 additional parameters did not compensate the systematic errors as well (version 12).

#### 3.2 Accuracy test of N93

The accuracy test of N93, also based on block-invariant APs, apparently gives better results. The sigma0 is a quarter of a pixel. A systematic error pattern still remains in the residuals (Figure 7, 2. row), however, the magnitude is much less than in K750i's case. It has clearly achieved submillimeter accuracy in object space (versions 22 and 23 in Table 3) in all coordinate directions.

Ver	GCP	CHK	TIE	APs	Rej	Sigma0	STD-X	STD-Y	STD-Z	RMSE-X	RMSE-Y	RMSE-Z	
						(µm)	of CHK	+TIE poin	ts (mm)	at CHK points (mm)			
						(pixel)	of only	GCP poin	ts (mm)	at G	at GCP points (mm)		
21	87	0	99	10	0	0.55	0.165	0.312	0.139	N.A.	N.A.	N.A.	
						0.25	0.051	0.084	0.050	0.044	0.074	0.028	
22	44	43	99	10	0	0.52	0.157	0.286	0.133	0.449	0.617	0.225	
						0.24	0.049	0.080	0.048	0.045	0.084	0.029	
23	10	77	99	10	0	0.50	0.161	0.284	0.140	0.701	0.816	0.203	
						0.23	0.047	0.077	0.046	0.036	0.101	0.030	
24	186			10	0	0.47	0.144	0.250	0.120	N.A.	N.A.	N.A.	
	free					0.21	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	

Table 3: Absolute accuracy test of N93.

#### 3.3 Accuracy test of W100

The W100 gives slightly better theoretical precision and empirical accuracy values than the N93 (Table 4). The standard deviation of image observations is in the same range with the N93, i.e. one quarter of a pixel. The W100 reveals similar residual errors like the N93 regarding the magnitude (Figure 7, 3, row).

Ver	GCP	CHK	TIE	APs	Rej	Sigma0	STD-X	STD-Y	STD-Z	RMSE-X	RMSE-Y	RMSE-Z
						(µm)	of CHK	+TIE poin	ts (mm)	at CHK points (mm)		
						(pixel)	of only	GCP poin	ts (mm)	at G	CP points (	mm)
31	87	0	92	10	0	0.59	0.114	0.203	0.094	N.A.	N.A.	N.A.
						0.27	0.030	0.050	0.030	0.036	0.052	0.029
32	44	43	92	10	0	0.55	0.104	0.181	0.084	0.298	0.369	0.221
						0.25	0.028	0.046	0.028	0.043	0.061	0.034
33	10	77	92	10	0	0.47	0.100	0.168	0.085	0.501	0.421	0.443
						0.21	0.022	0.035	0.021	0.049	0.078	0.050
34	179			10	0	0.44	0.083	0.140	0.067	N.A.	N.A.	N.A.
	free					0.20	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

Table 4: Absolute accuracy test of W100.

#### 3.4 Accuracy test of F828

The F828 gives the best performance and remarkably superior numbers compared to the other cameras (Table 5). Sigma0 goes down to 1/10 of a pixel. Also, the empirical RMSEs are here in much better agreement with the theoretical standard deviations.

Ver	GCP	CHK	TIE	APs	Rej	Sigma0	STD-X	STD-Y	STD-Z	RMSE-X	RMSE-Y	RMSE-Z	
						(µm)	of CHK	+TIE poin	ts (mm)	at CHK points (mm)			
						(pixel)	of only	GCP poin	ts (mm)	at G	at GCP points (mm)		
41	87	0	81	10	0	0.27	0.048	0.084	0.041	N.A.	N.A.	N.A.	
						0.10	0.022	0.037	0.022	0.026	0.032	0.023	
42	44	43	81	10	0	0.27	0.047	0.082	0.040	0.076	0.125	0.058	
						0.10	0.022	0.036	0.022	0.034	0.033	0.028	
43	10	77	81	10	0	0.26	0.049	0.084	0.043	0.097	0.144	0.134	
						0.10	0.022	0.036	0.022	0.055	0.033	0.022	
44	168			10	0	0.25	0.043	0.074	0.037	N.A.	N.A.	N.A.	
	free					0.09	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	

Table 5: Absolute accuracy test of F828.

#### 3.5 JPEG test with F828

The use of JPEG images for the image measurements of K750i, N93 and W100 raised the question whether the JPEG compression has an effect on the results. The original TIFF images of the F828 were converted to quality level 100 (maximum quality) and 70 JPEG images, using the free software IrfanView (version 3.98, <u>http://www.irfanview.com/</u>). Table 6 gives the results. The loss of empirical accuracy due to ~ 42 times JPEG compression is only 12 microns in depth (version 51 and 53 in Table 6). The other coordinates are of the same accuracy. Our results are controversial to those results given in LAM et al. (2001), LI et al. (2002) and SHIH & LIU (2005). However, their tests are on aerial images, while we have a close-range test object under good illumination conditions.

Ver	Compression	APs	Rej	Sigma0	STD-X	STD-Y	STD-Z	RMSE-X	RMSE-Y	RMSE-Z
				(µm)	m) of CHK+TIE points (mm)			at CHK points (mm)		
				(pixel)	(pixel) of only GCP points (mm)			at GCP points (mm)		
51	Original	10	0	0.26	0.047	0.082	0.040	0.077	0.120	0.059
	TIFF / 23,410 KB			0.10	0.022	0.036	0.022	0.034	0.033	0.028
52	5.5	10	0	0.26	0.047	0.082	0.040	0.078	0.124	0.059
	Q100 / 4,265 KB			0.10	0.022	0.036	0.022	0.034	0.033	0.027
53	41.6	10	0	0.26	0.047	0.082	0.040	0.077	0.132	0.060
	Q70 / 562 KB			0.10	0.022	0.036	0.022	0.033	0.033	0.028

Table 6: JPEG compression test with F828 (GCP/CHK/TIE are 44/43/81 respectively).

### 4 Analysis of results

In spite of giving the worst results in the test, the K750i still can offer sub-millimeters accuracy in the object space. Both block-invariant 10 and 44 additional parameter sets cannot compensate the systematic errors fully.

The first three cameras of the test K750i, N93 and W100 give identical standard deviation values for the image observations (between 1/4 - 1/5 pixel). They all apply a chip level image enhancement for sharpening the images. This effect is visible in Figures 5a, 5b and 5c. This low level image enhancement, while improving the visual quality, is probably reducing the geometric quality of the cameras. They show noticeably block-variant systematic errors after the self-calibrating bundle adjustment with block-invariant additional parameters.

The N93 and W100 have same lens systems (Zeiss, Vario-Tessar). The W100 has a CCD sensor of larger size with 8 Mpixels. It is 2.5 times larger than the CMOS sensor of N93. According to theoretical expectations, the N93 should give an accuracy of factor 1.6 ( $\sqrt{2.5}$ ) worse compared to the W100. The N93 almost strictly meets this expectation by giving 1.7-1.9 times worse numbers than the W100. On the other hand, there is a large difference between those two cameras, considering the size of the imaging system and the cost of the materials used in the construction. In this respect, the accuracy performance of the N93, as compared to the W100, is noteworthy.

Although the W100 and F828 have the same image format with 8 Mpixels, the expectation of equal accuracy does not hold here. The W100 gives substantially worse accuracy numbers (almost 3 times) than the F828. This is mainly due to a better lens system of the F828 and (possibly) the degrading chip level image enhancement operation of the W100.

## 5 Conclusions

We have metrically calibrated and we have tested the metric accuracy of four consumer-grade imaging devices: Two mobile phone cameras (Sony Ericsson K750i and Nokia N93) and two still video cameras (Sony DSC W100 and Sony DSC F828). The tests were performed by using our in-house 3D testfield. We have found unwanted effects from image enhancement (sharpening) in the K750i, N93 and W100 cameras and JPEG compression artifacts in the N93. In all four cases we have used (more or less) the same imaging geometry, and imaging conditions in order to make the results comparable.

With the given strong geometrical set-up of course all parameters for the interior orientation could be calibrated reliably.

The accuracy tests showed that in all cases the theoretical expectations, as defined by the average standard deviations of the object space coordinates, could not be achieved by the empirical RMSEs, computed from checkpoints. The deviations range from factor 3.3 (K750i) to factor 1.7 (F828). While the sigma0 values of the K750i, N93 and W100 are all at a 1/5 pixel level, they drop down to 1/10 pixel with the F828. This improvement in sigma0 is matched by the better behaviour of the post-adjustment image residuals. Only in case of the F828 do we get an almost random distribution. The other cameras, in particular the K750i, suffer from strong image-variant systematic errors. Since we have used in our self-calibration only block-invariant additional parameters these errors could not be compensated. The error patterns are also not in agreement with what we are used to in photogrammetry. Therefore, our standard additional parameter functions cannot compensate these defects. So far we cannot explain the reasons for these errors. Could they lie in the image enhancement procedure or any other shortcomings in the electronic circuits?

Nevertheless, and despite these problems, we could reach relative accuracies of 1:8 000 in-plane and 0.03% of average depth with the K750i and 1:34 000 in-plane and 0.005% of average depth with the F828, using in both cases 10 control points. This superior behaviour of the F828 can only partly be explained by the larger image format (8 Mpixels versus 2 Mpixels), which theoretically should only lead to an improvement of factor 2.

If we apply to both cameras a free network adjustment by minimizing the trace of the covariance matrix for the object space coordinates we get the following values: 1:25 000 and 0.009% for the K750i and 1:99 000 and 0.0025% for the F828. This shows roughly the same relationship between both cameras, it gives however a better indication of the potential system accuracy. It is worthwhile to note that, compared to the film-based large format aerial photogrammetric block adjustment accuracy, we can achieve here the same and better accuracies in height and almost the same in planimetry, if we consider for the aerial case an object area of one image coverage only (like in our close-range case). This definitely indicates the great potential of consumer-grade and even mobile phone cameras for photogrammetric processing. The main remaining problem is to find a convincing explanation for the image-to-image varying systematic error pattern in some of the mobile phone cameras.

In a final test we also checked the effect of JPEG compression on the metric system accuracy for the F828 camera. Even when going up to a factor of 42 compression rate we did get only a small reduction in accuracy (9% in depth direction). This can be considered harmless.

Our future plans are to spread these tests over a longer time period in order to check the temporal stability of the calibration and also invest some more work into image quality studies.

In conclusion we can state that mobile cameras do give us a very interesting option for doing "mobile photogrammetry", in terms of accuracy, costs and flexibility.

The integration of GPS receivers and motion sensors will further broaden their applicability.

#### 6 Acknowledgements

The authors thank Mr. Thomas Hanusch and Mr. Timo Kahlmann for helping with the geodetic measurements of the testfield and Dr. Jafar Amiri Parian for running his self-calibrating bundle adjustment software with 44 additional parameters.

### 7 Literature

- AL-BAKER, O., BENLAMRI, R. & AL-QAYEDI, A., 2005: A GPRS-based remote human face identification system for handheld devices. Wireless and Optical Communication Networks (WOCN'05), Dubai, UAE, March 6-8, pp. 367-371.
- BEYER, H., 1992: Geometric and radiometric analysis of a CCD-camera based photogrammetric close-range system. PhD thesis, IGP, ETH Zurich, Mitteilungen Nr. 51.
- CHOWDHURY, A., DARVEAUX, R., TOME, J., SCHOONEJONGEN, R., REIFEL, M., DE GUZMAN, A., PARK, S.S., KIM, Y.W. & KIM, H.W., 2005: Challenges of megapixel camera module assembly and test. Electronic Components and Technology Conference, Spa Lake Buena Vista, Florida, USA, May 31 – June 3, pp. 1390 -1401.
- CHUNG, Y., JANG, D., YU, W., CHI, S., KIM, K. & SOH, J., 2004: Distortion correction for better character recognition of camera based document images. Photonics Applications in Astronomy, Biomedicine, Imaging, Materials Processing, and Education, SPIE Vol. 5578, pp. 389-399.
- CLEMENS, G., SANAHUJA, F. & BEAUGEANT, C., 2005: Audio-enhanced panoramic image capturing and rendering on mobile devices. Multimedia and Expo (ICME'05), Amsterdam, the Netherlands, July 6-8, pp. 988-991.

- GRUEN, A., 1978: Progress in photogrammetric point determination by compensating of systematic errors and detecting of gross errors. ISPRS Commission III Symposium, Moscow, USSR, pp. 113-140.
- GRUEN, A., 1985: Adaptive least squares correlation: A powerful image matching technique. South African J. of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography, **14** (3): 175-187
- KOGA, M., MINE, R., KAMEYAMA, T., TAKAHASHI, T., YAMAZAKI, M. & YAMAGUCHI, T., 2005: Camera-based Kanji OCR for mobile-phones: Practical issues. Document Analysis and Recognition, Seoul, Korea, August 29 - September 1, pp. 635-639.
- LAM, K.W.K., LI, Z. & YUAN, X., 2001: Effetcs of JPEG compression on the accuracy of Digital Terrain Models automatically derived from digital aerial images. The Photogrammetric Record, **17** (98): 331-342.
- LENZ, R.K. & TSAI, R.Y., 1988: Techniques for calibration of the scale factor and image center for high accuracy 3-D machine vision metrology. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **10** (5): 713-720.
- LI, Z., YUAN, X. & LAM, K.W.K., 2002: Effects of JPEG compression on the accuracy of photogrammetric point determination. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 68 (8): 847-853.
- MYUNG-JIN, C., 2005: Development of compact auto focus actuator for camera phone by applying new electromagnetic configuration. Optomechatronic Actuators and Manipulation, Sappora, Japan, December 5, SPIE Vol. 6048, pp. 60480J-1-9.
- PARIKH, T.S., 2005: Using mobile phones for secure, distributed document processing in the developing world. Pervasive Computing, April-June 2005: 74-81.
- PHYSORG, 2004: Sharp Develops 2-Megapixel CCD Camera Module for Mobile Phones with New 2X Optical Inner Zoom Lens. <u>http://www.physorg.com/news1207.html</u> (accessed on 30.04.07).
- PHYSORG, 2005: Sharp Develops Two New 3-Megapixel CCD Camera Modules for Mobile Phones. <u>http://www.physorg.com/news6096.html</u> (accessed on 30.04.07).
- PITTORE, M., CAPPELLO, M., ANCONA, M. & SCAGLIOLA, N., 2005: Role of image recognition in defining the user's focus of attention in 3G phone applications: The AGAMEMNON experience. Image Processing, Genova, Italy, Sep. 11-14, pp. 1012-1015.
- RIEGEL, T.B., 2005: MPEG-4 based 2D facial animation for mobile devices. Multimedia on Mobile Devices, SPIE Vol. 5684, pp. 55-62.
- ROHS, M., 2004: Real-world interaction with camera phones. Ubiquitous Computing Systems (UCS'04), Tokyo, Japan, LNCS 3598, pp. 74-89.
- SHIH, T.-Y. & LIU, J.-K., 2005: Effects of JPEG 2000 compression on automated DSM extraction: evidence from aerial photographs. Photogrammetric Record, 20 (112): 351-365.
- UEDA, N., NAKANISHI, Y., MATSUKAWA, S. & MOTOE, M., 2004. Developing a GIS using a mobile phone equipped with a camera and a GPS, and its exhibitions. Distributed Computing Systems Workshop, Hachioji, Tokyo, Japan, March 23-24, pp. 414-417.
- WATANABE, Y., SONO, K., YOKOMIZO, K. & OKADA, Y., 2003: Translation camera on mobile phone. Multimedia and Expo, Baltimore, Maryland, USA, July 6-9, pp. II-177-180.
- WILLIAMS, M., 2006: CeBIT: Samsung Shows 10-Megapixel Camera Phone. PCWORLD, 03/2009, http://www.pcworld.com/article/id,125020/article.html (accessed on 30.04.07).

# Genauigkeitsuntersuchung von Kameras mit Foveon-Farbsensoren

## JÜRGEN PEIPE<sup>1</sup>, DIRK RIEKE-ZAPP<sup>2</sup> & WERNER TECKLENBURG<sup>3</sup>

Zusammenfassung: Die neu entwickelte digitale Spiegelreflexkamera Sigma SD14 wird auf ihre Eignung für photogrammetrische Messzwecke hin untersucht. Das Besondere an dieser Kamera ist der eingebaute Foveon X3 Sensor, der die Bestimmung der RGB-Grundfarben direkt für jedes Pixel ermöglicht. Für die Testmessungen wird ein Prüfkörper benutzt, der nach den Vorgaben der VDI/VDE-Richtlinie 2634 hergestellt wurde.

## 1 Einleitung

Angesichts der Vielzahl verfügbarer digitaler Kameras unterschiedlicher Bauweise, Handhabung und Qualität ist der Photogrammeter gehalten, das für seine Messaufgabe geeignete Aufnahmesystem und dessen Genauigkeit durch eigene Untersuchungen zu ermitteln, in der Regel durch Kalibrierung und/oder andere Testmessungen. Dies gilt insbesondere für neu auf den Markt gekommene Systeme. Dabei führt die Weiterentwicklung der Kameratechnik u.a. zu neuen Sensoren (Art des Sensors, Größe, Pixelzahl, Pixelabstand), Objektiven (spezielle "digitale" Objektive, optische Bildstabilisierung), Bildgenerierungsmethoden (Interpolation, Rauschunterdrückung, Datenkomprimierung) und Bildübertragungstechniken (z.B. W-LAN).

In den letzten Jahren hat sich gezeigt, dass digitale Kameras den auf Film aufzeichnenden, analogen Kameras in vielen Bereichen überlegen sind, in mancher Hinsicht jedoch nicht. Hier ist vor allem die Abbildungsqualität der generierten Farbaufnahmen zu nennen. "Normale" Digitalkameras nehmen mit Hilfe des Sensors die Intensität des Lichtes auf, sie sind helligkeitsempfindlich, aber nicht farbempfindlich. Die Farbtöne werden mit Hilfe von Filtern und Interpolationsberechnungen erzeugt. Dies kann zu Farbverfälschungen, Farbsäumen und leichter Unschärfe führen.

Auf der Suche nach einem Konzept zur direkten Farbermittlung - d.h. jedes Pixel ist in der Lage, grünes, rotes und blaues Licht zu erkennen - hat die Fa. Foveon vor einigen Jahren einen Sensor entwickelt, der in drei übereinander liegenden Schichten farbempfindliche Elemente aufweist. Dieser Sensor, eingebaut in die Spiegelreflexkameras Sigma SD9 und SD10, hatte eine vergleichsweise geringe Pixelzahl. Inzwischen steht die Kamera Sigma SD14 zur Verfügung, ausgerüstet mit einem neuen Foveon-Sensor mit 2652 x 1768 Pixeln. Mit dieser Kamera wurden erste Testmessungen an einem Prüfkörper durchgeführt, über die im Folgenden berichtet wird.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Jürgen Peipe: Universität der Bundeswehr München, Institut für Photogrammetrie und Kartographie, Werner-Heisenberg-Weg 39, D-85577 Neubiberg, e-mail: j-k.peipe@unibw-muenchen.de

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Dirk Rieke-Zapp: Universität Bern, Institut für Geologie, Baltzerstraße 1+3, CH-3012 Bern, e-mail: zapp@geo.unibe.ch

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Werner Tecklenburg: Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven, Institut f
ür Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik, Ofener Str. 16/19, D-26121 Oldenburg, e-mail: tecklenburg@fholdenburg.de

### 2 Sigma-Kameras mit Foveon-Farbsensor

Vor gut vier Jahren wurde mit der Spiegelreflexkamera Sigma SD9 die erste, mit einem Foveon X3 Farbsensor ausgerüstete Kamera auf den Markt gebracht. Dieser Sensor, wegen seiner speziellen Eigenschaften in der Fachpresse bzw. vom Hersteller auch als Vollfarbsensor, Direkt-Bildsensor etc. bezeichnet, ist ähnlich wie ein Farbfilm in drei Schichten aufgebaut und gestattet so die Aufzeichnung der Rot-, Grün- und Blau-Information an jeder Pixelposition. Im Unterschied hierzu ermöglichen "übliche" Sensoren, die mit einem sogenannten Bayer-Filter ausgerüstet sind, lediglich die Erfassung *einer* Farbe pro Pixel. RGB-Werte pro Bildelement entstehen im Nachhinein durch Interpolation aus den Nachbarpixeln. Diese Vorgehensweise kann Unschärfen und Farb-Artefakte hervorrufen und dadurch die Bildqualität mindern.

Die Eigenschaft des Foveon-Sensors, vollständige Farbinformation an jeder Pixelposition zu liefern, beruht darauf, dass Licht unterschiedlicher Wellenlänge unterschiedlich tief in den Silizium-Chip eindringt. Es kommt also darauf an, die Lichtintensität in drei Ebenen des Sensors zu erfassen und anschließend in RGB-Werte umzuwandeln. Diese direkte Bestimmung der Farbinformation führt zu einer hohen Auflösung von Helligkeits- und Farbkontrasten. Als Nachteil des X3 Sensors wird die relativ geringe Zahl der - allerdings dreifach registrierten - Pixel der Bildmatrix gewertet. Zudem tritt relativ starkes Rauschen bei der Datenerfassung und Datenumrechnung auf, das durch geschickte Bildverarbeitung minimiert werden muss (FOTOMAGAZIN 2007).

Nachdem die Sigma SD9 schon bald durch eine in wenigen Einzelheiten verbesserte Version SD10 abgelöst worden war, wurde bei der Photokina 2006 ein wesentlich erweitertes Modell vorgestellt, die SD14 (Abb. 1). Vergleicht man die technischen Daten der beiden Kameras (Tab. 1), so zeigen sich als wichtigste Neuerungen die bei gleicher Sensorgröße erhöhte Pixelzahl, die Möglichkeit der Datenausgabe im JPEG-Format (zusätzlich zum bisherigen RAW-Format, das es auch weiterhin gibt) und ein in die Kamera eingebauter Blitz.



Abbildung 1: Sigma SD14 Spiegelreflexkamera (SIGMA 2007)

Kamera	Sigma SD10	Sigma SD14		
Sensor	Vollfarb-CMOS; 20.7 x 13.8 mm	Vollfarb-CMOS; 20.7 x 13.8 mm		
	3 x 3.4 Mio. Pixel (eff.)	3 x 4.7 Mio. Pixel (eff.)		
Dateiformat	RAW	RAW, JPEG		
Gehäuseblitz	nein	ja		
Abmessungen, Gewicht	152 x 120 x 79 mm; 858 g	144 x 107.3 x 80.5 mm; 700 g		

Tabelle1: Technische Spezifikationen von Sigma SD10 und SD14 (FOTOMAGAZIN 2007)

Erste Testberichte in Fotozeitschriften weisen darauf hin, dass die Qualität der JPEG-Bilder der SD14 noch zu wünschen übrig lässt (FOTOMAGAZIN 2007). Hier ist wohl Spielraum für Verbesserungen der kamera-internen Bildverarbeitungssoftware.

Für den Photogrammeter kann die Sigma SD14 eine interessante Alternative zu üblicherweise eingesetzten Spiegelreflexkameras mit "normalem" Sensor bieten, falls trotz geringerer Pixelzahl bei der SD14 eine bessere Bildqualität entsteht, die zu einer gesteigerten Bildmessgenauigkeit führt.

## 3 Photogrammetrische Untersuchungen

Für die Testmessungen an einem Prüfkörper nach VDI/VDE 2634 standen eine Sigma SD10 und zwei SD14 mit 14 mm, 18 mm und 20 mm Weitwinkelobjektiven zur Verfügung. Mehrere Bildverbände mit je etwa 90 Bildern wurden erzeugt. Konvergente Aufnahmen in drei Höhenstufen deckten das Objekt vielfach überbestimmt ab. Auch gewälzte Aufnahmen von mehreren Standpunkten waren im Verband enthalten, um die Bestimmung der Parameter der inneren Orientierung durch Simultankalibrierung sicherzustellen. Die Bilder wurden als verlustfreie RAW-Daten registriert (2640 x 1760 Pixel; je Bild ca. 13.3 MB), aus denen per Sigma-Software TIFF-Daten und JPEG-Daten (2640 x 1760 Pixel; je Bild ca. 3.3 MB) abgeleitet wurden.

Die Bilder wurden in vier Varianten ausgeglichen, die sich durch die Modellierung des Bildraums unterscheiden. Zunächst sind im Lösungsansatz ein für alle Bilder gleicher Satz von Parametern c,  $x_0$ ,  $y_0$  der inneren Orientierung sowie A1, A2, A3 für die radial-symmetrische Verzeichnung und B1, B2 für die tangentiale Verzeichnung enthalten. In der zweiten Variante treten Parameter C1, C2 für Affinität und Scherung hinzu. Die dritte Variante gleicht Variante 1, mit dem Unterschied, dass das Projektionszentrum im Bildraum bildvariant bestimmt wird, d.h. jedes Bild seine eigenen Werte c,  $x_0$ ,  $y_0$  hat. Letztlich sind bei der vierten Variante wiederum die Parameter C1, C2 dabei, zusätzlich zur bildvarianten Bestimmung der Projektionszentren.

Zur Beurteilung der Genauigkeit der Objektrekonstruktion werden - nach VDI/VDE 2634 - die Längenmessabweichungen an kalibrierten Testlängen herangezogen (Positive und negative Maximalwerte aus dem Vergleich photogrammetrisch berechneter und kalibrierter Längen bilden die Spanne).

Es sollen nun an dieser Stelle nicht die Ergebnisse aller Rechenläufe tabellarisch vorgeführt werden, sondern zusammenfassend die ersten Erfahrungen mit den untersuchten Kameras genannt werden:

- Sowohl die mit der SD10 als auch die mit der SD14 aufgenommenen Bildverbände führten bei Ausgleichung mit den Bündelprogramm-Varianten 1 und 2 zu großen Längenmessabweichungen (Spanne > 300 - 600 μm, je nach Kamerakörper-Objektiv-Kombination).
- Durch bildvariante Kalibrierung (Variante 3 und 4) wird eine Verbesserung um den Faktor 2 erreicht. Grund hierfür könnte eine nicht ausreichende Stabilität der Verbindung Kamerakörper-Objektiv sein, die sich bei den relativ langen und schweren Sigma-Objektiven fatal auswirkt.
- Die besten Ergebnisse (Spanne: 150  $\mu$ m) ließen sich bei der Verbindung SD10 mit dem 18 mm Objektiv (mit Ausgleichungsvariante 3) und SD14 mit dem 20 mm Objektiv (mit Ausgleichungsvariante 4) erzielen.
- Letztlich sind die mit SD10 und SD14 erreichten Resultate ähnlich, d.h. die größere Pixelzahl der SD14 wird nicht in eine Genauigkeitssteigerung umgemünzt. Anders betrachtet: Es sind wohl eine ganze Reihe von genauigkeitsmindernden Einflüssen vorhanden (Instabilitäten von Sensor und Objektivverbindung, Bildverarbeitung ...), was durch die höhere Pixelzahl nicht ausgeglichen werden kann.
- Generell liefert das jeweils längerbrennweitige Objektiv die besseren Ergebnisse. Allerdings ist hier zu bemerken, dass es sich bei den 14 mm und 18 mm Objektiven um etwas ältere Modelle handelt; das 20 mm Objektiv ist relativ neu auf dem Markt.
- Aus RAW-Daten abgeleitete TIFF- und JPEG-Bilder führen zu gleich genauen Ergebnissen.

### 4 Schlussbemerkungen

Trotz des Foveon-Sensors mit seinen besonderen Abbildungseigenschaften lassen die Sigma-Kameras SD10 und SD14 keine so hohen Genauigkeitswerte zu, wie sie zur Zeit mit hochauflösenden "normalen" Spiegelreflexkameras wie z.B. der Nikon D2Xs erreichbar sind. Dies liegt wohl an Instabilitäten der Kameras, vielleicht auch an einer noch nicht perfekten Bilderzeugung das nächste Firmware-Update ist angekündigt.

### 5 Literaturverzeichnis

FOTOMAGAZIN, 2007: Sigma SD14 - Schichtarbeit. fotoMagazin 5/2007: 30-32 SIGMA, 2007: Produktinformation Sigma SD10 und SD14, www.sigma.de (27.04.07) VDI/VDE, 2002: VDI/VDE-Richtlinie 2634. Beuth Verlag, Berlin

## Automatische Orientierung mit und ohne Messmarken – Das Mögliche und das Unmögliche

#### HELMUT MAYER<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Mit Hilfe des 5-Punkt Algorithmus von NISTÉR (2004) kann die relative Orientierung von zwei kalibrierten Kameras direkt, d.h., ohne Näherungen, bestimmt werden. Zusammen mit Random Sample Consensus (RANSAC) können Bildpaare mit natürlicher Textur auch bei großer Basis und z.B. 95% falschen Zuordnungen automatisch stabil orientiert werden. Durch Verknüpfung zu Tripeln und von Tripeln erhält man eine relative Orientierung für Sequenzen auf alleiniger Grundlage von Bildern und (u.U. genäherter) Kalibrierung. Dieser Möglichkeit steht das Unmögliche gegenüber, nämlich die Orientierung stark projektiv verzerrter Bilder mit unkodierten, angeblitzten, gleich aussehenden Messmarken, für die es keine Einschränkung der Zuordnung gibt. Als Lösungsmöglichkeit wird die Verknüpfung der beiden Vorgehensweisen vorgeschlagen: Für die Orientierung wird die in nicht durch Blitz völlig überstrahlten Bildern meist vorhandene natürliche Textur verwendet. Unkodierte Messmarken werden über die dann bekannte Epipolargeometrie und Trifokaltensoren zugeordnet, was neue Anwendungsmöglichkeiten durch die verstärkte Automatisierung eröffnen sollte. Mögliches und Unmögliches werden an Hand von Beispielen erläutert

#### 1 Einleitung

Die automatische Orientierung von (evtl. unkalibrierten) Bildern hat in den letzten Jahren einen hohen Stand erreicht. Gute Beispiele sind (POLLEFEYS et al. 2004, LHUILLIER & QUAN 2005). In der Photogrammetrie dokumentiert (REMONDINO & EL-HAKIM 2006) den Stand. Der vorgelegte Beitrag zeigt neue Entwicklungen für die Orientierung kalibrierter Bilder auf und stellt dar, wie diese für die Orientierung mit unkodierten Messmarken genutzt werden könnten, was durch die verstärkte Automatisierung neue Anwendungen eröffnen sollte.

Mit dem 5-Punkt Algorithmus (NISTÉR 2004) kann die relative Orientierung von zwei kalibrierten Kameras auf Grundlage von fünf korrespondierenden Punkten direkt, d.h., ohne Näherungen, bestimmt werden. In Kombination mit Random Sample Consensus – RANSAC (FISCHLER & BOLLES 1981) ermöglicht er die automatische Orientierung, auch wenn bei der Bildzuordnung bis zu 95% der Punkte falsch zugeordnet werden. Damit wird es möglich, Bildpaare mit natürlicher Textur ohne Messmarken auch bei großer Basis stabil zu orientieren. Die Grundlage für die Zuordnung auf Basis von Kreuzkorrelation und kleinsten Quadraten bilden markante Punkte. Um mehr als zwei kalibrierte Bilder relativ zu orientieren, werden Tripel gebildet. Tripel werden als Grundelemente des vorgestellten Ansatzes verwendet. Für sie können Punkte auf Grundlage geometrischer Schnittbedingungen eindeutig kontrolliert werden, was die Zuverlässigkeit stark erhöht. Für vier und mehr Bilder werden Tripel über ihre Projektionsmatrizen verknüpft. Zur Steigerung der Effizienz werden Bildpyramiden verwendet. Insgesamt erhält man eine vollauto-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Helmut Mayer: Universität der Bundeswehr München, Institut für Photogrammetrie und Kartographie, 85577 Neubiberg, Tel.: +49-89-6004-3429, Fax: +49-89-6004-4090, e-mail: Helmut.Mayer@unibw.de

matische relative Orientierung von Sequenzen auf alleiniger Grundlage von Bildern und (u.U. genäherter) Kalibrierung.

Dem hiermit Möglichen steht das Unmögliche gegenüber: Es besteht aus Bildern mit unkodierten Messmarken, die so angeblitzt wurden, dass der Hintergrund schwarz wird. Da alle Messmarken gleich aussehen, kann jede Messmarke im einen jeder Messmarke im anderen Bild zugeordnet werden. Dies führt schon bei zwanzig Messmarken zu 95% Fehlzuordnungen, dem Limit für RANSAC-basierte Ansätze. Zwar kann die Anordnung der Punkte zur Einschränkung der Zuordnung verwendet werden, allerdings funktioniert dies nur für nicht zu stark auseinander liegende und damit unterschiedlich projektiv verzerrte Ansichten.

In diesem Beitrag wird als Lösung vorgeschlagen, die beiden oben vorgestellten Vorgehensweisen zu kombinieren: Für die grundlegende Orientierung wird die in nicht durch Blitz völlig überstrahlten Bildern meist vorhandene natürliche zufällige und damit mehr oder weniger eindeutig zuordnebare Textur verwendet. Unkodierte Messmarken können dann über die bekannte Epipolargeometrie und Trifokaltensoren zugeordnet werden.

In Abschnitt 2 werden die grundlegenden Ideen des 5-Punkt Algorithmus und von RANSAC vorgestellt. Hierauf baut der Abschnitt 3 auf, der sich mit der Orientierung von Bildsequenzen beschäftigt. Abschnitt 4 illustriert das Unmögliche und Abschnitt 5 zeigt eine Lösungsmöglichkeit auf. Dies wird mit einer längeren, aus jeweils sechs Megapixeln großen Bildern bestehender, Sequenz illustriert und diskutiert. Das Papier schließt mit einem Ausblick.

### 2 5-Punkt Algorithmus und RANSAC

Der 5-Punkt Algorithmus (NISTÉR 2004) löst zum ersten Mal die Orientierung von zwei Bildern direkt, d.h., ohne Näherungen. Grundlage hierfür ist die Verwendung der Bedingungen, die für den kalibrierten Fall gelten und eine geeignete mathematische Formulierung.

Auch wenn in diesem Papier davon ausgegangen wird, dass Kalibrierungsinformation für die Aufnahmen vorhanden ist, impliziert dies nicht, dass vor der Aufnahme eine (Labor-) Kalibrierung durchgeführt werden muss. Die Erfahrung zeigt, dass z.T. relativ grobe Näherungen, z.B. von mehr als 5% Fehler, die man von älteren ausgewerteten Sequenzen oder z.T. auch aus Erfahrungen mit ähnlichen Kameras erhält, für eine Orientierung ausreichen können.

Sobald eine genäherte Orientierung vorliegt, kann diese mit Selbstkalibrierung (MCGLONE et al. 2004) verbessert werden. Weiterhin ist anzumerken, dass z.B. mit dem Ansatz von (POLLE-FEYS et al. 2004) aus Aufnahmen mit genügend großer Basislänge und 3D Struktur ausreichende Näherungen für die Kalibrierung direkt aus Bildern bestimmt werden können.

Grundlage des 5-Punkt Algorithmus ist die Komplanaritätsbedingung. Hierfür transformiert man die beobachteten Bildpunkte mittels euklidischer Rotationsmatrix **R** und Kalibriermatrix **K**. Man erhält reduzierte (homogene) Bildkoordinaten <sup>k</sup>x' und <sup>k</sup>x'' für erstes und zweites Bild. Die erste Kamera kann mittels der Projektionsmatrix (**J**0) und die zweite mittels (**J**T) beschrieben werden. Dabei ist **T** der Basisvektor. Die Bedingung, dass sich die Strahlen schneiden, impliziert die Komplanarität von <sup>k</sup>x', <sup>k</sup>x'' und **T**. Es ergibt sich (das Vektorprodukt × steht senkrecht auf der aus <sup>k</sup>x'' und **T** gebildeten Ebene, in der auch <sup>k</sup>x' liegt, somit wird das Skalarprodukt 0):

$${}^{\mathbf{k}}\mathbf{x}' \ (\mathbf{T} \ \times \ {}^{\mathbf{k}}\mathbf{x}'') \ = \ {}^{\mathbf{k}}\mathbf{x}'^{\mathbf{T}}\mathbf{S}_{\mathbf{T}}^{-\mathbf{k}}\mathbf{x}'' = 0 \qquad \text{mit} \qquad \mathbf{S}_{\mathbf{T}} = \mathbf{S}(\mathbf{T}) = \begin{pmatrix} 0 & -\mathbf{T}_{3} & \mathbf{T}_{2} \\ \mathbf{T}_{3} & 0 & -\mathbf{T}_{1} \\ -\mathbf{T}_{2} & \mathbf{T}_{1} & 0 \end{pmatrix}.$$

**S**<sub>T</sub> ist die schiefsymmetrische Matrix zum Vektor **T** mit Rang 2, die das Vektorprodukt **V** = **T** × **U** als Matrix-Vektor-Multiplikation darstellt. Damit ergibt sich insgesamt wegen  $(\mathbf{R}^{r-1})^{T} = \mathbf{R}^{r}$  (Drehmatrix) und mit **K** als projektiver, d.h., mit einem Skalar multiplizierter, Kalibriermatrix

$$\mathbf{x'}^{\mathrm{T}} (\mathbf{K'}^{-1})^{\mathrm{T}} \mathbf{R} \mathbf{S}_{\mathrm{T}} \mathbf{R''}^{-1} \mathbf{K''}^{-1} \mathbf{x''} = 0$$
.

Diese Beziehung ist linear in den Bildkoordinaten beider Bilder, d.h., insgesamt bilinear. Mit der so genannten  $3 \times 3$  "Fundamentalmatrix"

$$\mathbf{F} = (\mathbf{K}^{-1})^{\mathrm{T}} \mathbf{R}^{\mathrm{T}} \mathbf{S}_{\mathrm{T}} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{K}^{-1}$$

kann die Komplanaritätsgleichung als Bedingung für die Homologie der Bildpunkte einfach dargestellt werden:  $\mathbf{x}^{T}\mathbf{F}\mathbf{x}^{"}=0$ . Daraus, dass der Kern von  $\mathbf{F}$  die Matrix  $\mathbf{S}_{T}$  mit Rang 2 ist, ergibt sich die kubische Bedingung

$$\det(\mathbf{F}) = 0 \tag{1}$$

die sich auch darin ausdrückt, dass ein Singulärwert von  $\mathbf{F}$  0 ist. Für die essentielle Matrix  $\mathbf{E}$ , die man erhält, wenn die Kalibrierung bekannt ist,

$$\mathbf{x'}^{\mathrm{T}} (\mathbf{K'}^{-1})^{\mathrm{T}} \mathbf{E} \mathbf{K''}^{-1} \mathbf{x''} = 0$$

gilt weiterhin, dass die beiden übrigen Singulärwerte gleich groß sind. Dies kann mittels der folgenden neun kubischen Bedingungen beschrieben werden:

$$\mathbf{E}\mathbf{E}^{\mathrm{T}}\mathbf{E} - \frac{1}{2}\mathbf{Spur}(\mathbf{E}\mathbf{E}^{\mathrm{T}})\mathbf{E} = 0$$
<sup>(2)</sup>

Die Lösung des Systems von Gleichungen basiert auf Singulärwertzerlegung. Für fünf Punkte erhält man einen rechten Nullraum aus vier Vektoren. Die essentielle Matrix entspricht einer Linearkombination der vier Vektoren. Zur Bestimmung der Skalare der Linearkombination werden sie in die kubischen Bedingungen der Gleichungen (1) und (2) eingesetzt und es wird eine Gauß-Jordan Elimination durchgeführt. Weitere Umformungen führen zu einem Polynom zehnten Grades. NISTÉR (2004) verwendet zur schnellen Lösung Sturm-Sequenzen.

In (NISTÉR 2004) wird gezeigt, dass bei realen Beispielen, wenn auch sehr selten, bis zu zehn Lösungen auftreten können. In den allermeisten Fällen gibt es allerdings zwischen einer und vier Lösungen. Während die Bestimmung der Fundamentalmatrix für eine Vorwärtsbewegung etwas stabiler sein kann, hat die essentielle Matrix für Seitwärtsbewegungen große Vorteile, so dass insgesamt die essentielle Matrix im Allgemeinfall vorzuziehen ist.

Achtung: Die Bestimmung einer "kalibrierten" Fundamentalmatrix ist nicht gleichzusetzen mit der Bestimmung der essentiellen Matrix, da hierbei die Bedingungen aus Gleichung (2) nicht eingehalten werden. Praktisch führt dies zum Problem der Chiralität (HARTLEY & ZISSERMAN 2003), das darin besteht, dass Teile der Punkte vor und andere Teile hinter der Kamera liegen.

Dies ist kein Fehler in der Berechnung, sondern entspricht einer korrekten projektiven Rekonstruktion, wie sie implizit mittels der Fundamentalmatrix beschrieben wird.

Mittels des 5-Punkt Algorithmus kann direkt eine Lösung für die relative Orientierung bestimmt werden. Praktisch tritt aber das Problem auf, dass bei der Zuordnung von Punkten viele Fehler auftreten. In schwierigeren Fällen mit sich wiederholender Textur und großen Basen können z.B. 95% der Punkte inkorrekt sein. Um trotzdem eine richtige Lösung zu erhalten, eignet sich besonders das Random Sample Consensus – RANSAC (FISCHLER & BOLLES 1981) Verfahren.

Dessen grundlegende Idee ist konträr zu vielen anderen robusten Verfahren: Statt aus allen Beobachtungen eine Lösung zu berechnen und dann schlecht passende Beobachtungen zu eliminieren, wird zufällig ein Minimalsatz von Beobachtungen (z.B. kann aus drei Punkten ein Kreis bestimmt werden) zur Lösung des Problems ausgewählt und dann bewertet, wie gut die entsprechende Lösung zu den Beobachtungen passt (d.h., für obiges Beispiel, ob die Punkte nah genug am Kreis liegen). Dies geschieht in einer mehr oder weniger großen Zahl von Iterationen und am Ende wird die am besten bewertete Lösung als Ergebnis verwendet.

Der Vorteil ist, dass man für Probleme mit kleinen Minimalsätzen von Beobachtungen, d.h., für die die Kombinatorik gut ist, z.T. auch bei nur 5% oder weniger korrekten Daten eine stabile Lösung erhalten kann. Neben der Bedingung, dass der Minimalsatz klein sein sollte, ist ein Kriterium für die Evaluierung der Lösung notwendig. So muss bei dem obigen Beispiel bekannt sein, bis zu welchem Abstand von einem Kreisring ein Punkt auf dem Kreis liegt. Diese Kriterien basieren z.T. auf aus Ausgleichung abschätzbaren Messgenauigkeiten, sind aber manchmal auch anwendungsabhängig. So hat z.B. die Frage, ob Punkte einer Wand auf einer Ebene liegen, weniger mit der Mess- als vielmehr mit der Baugenauigkeit zu tun, die nicht direkt aus den Messungen ableitbar ist.

### 3 Orientierung von Bildsequenzen

Die oben beschriebenen 5-Punkt Algorithmus und RANSAC suchen aus Mengen von fünf Punktpaaren möglicher Zuordnungen die Menge aus, die bei der vorgegebenen Kalibrierung zur besten – d.h., möglichst viele Punkte korrespondieren möglichst genau – Orientierung führt.

Die korrespondierenden Punkte werden zuerst einzeln in den Bildern mit dem Förstner Operator (FÖRSTNER & GÜLCH 1987) bestimmt. Für die Punkte wird Rotationsinvarianz über die Nutzung von Richtungsinformation in Form des Eigenvektors des Förstner Operators erreicht. Die entsprechend des Eigenvektors rotierten Punkte werden durch farbige Kreuzkorrelation verglichen. Man erhält ein Histogramm der relativen Winkel der zugeordneten Punkte. Der zum Maximum des Histogramms korrespondierende Winkel wird als maximaler Konsens und damit als Schätzung der relativen Rotation der beiden Bilder gegeneinander betrachtet. Hiermit werden im Weiteren alle Bildpunkte des zweiten Bildes gedreht und es wird noch einmal die Kreuzkorrelation durchgeführt. Liegt der Korrelationskoeffizient oberhalb eines empirisch bestimmten Schwellwertes von 0.5, so erfolgt eine kleinste Quadrate Zuordnung, nach der Punktpaare auf Grundlage von Genauigkeit und Korrelation > 0.9 aussortiert werden.

Für drei Bilder, die wegen der im Vergleich zu Paaren deutlich erhöhten Zuverlässigkeit der Orientierungsbestimmung das Grundelement des vorgestellten Ansatzes bilden, da hier die Punkte über geometrische Schnittbedingungen eindeutig kontrolliert werden, können Trifokal-

tensoren verwendet werden (HARTLEY & ZISSERMAN 2003). Allerdings gibt es (bisher) keine direkte Lösung für den kalibrierten Trifokaltensor. Deswegen wird hier zweimal der 5-Punkt Algorithmus verwendet. Hierbei darf allerdings nicht wie bei (relativen) Bildpaaren zweimal die Basis auf eins gesetzt werden, sondern es muss die zweite Basis an die erste angepasst werden. Die verwendete Lösung besteht darin, dass für die durch die Zuordnung vorliegenden fünf Punkttripel jeweils in den zwei Bildpaaren die Punkte 3D trianguliert werden und für das gemeinsame Bild die Abstände bestimmt werden. Das Verhältnis der Abstände entspricht dem Verhältnis der Längen der Basen. Zur Verbesserung der Robustheit wird der Median verwendet.

Für vier und mehr Bilder werden Tripel über die Projektionsmatrizen mit Hilfe von 3D Homographien verknüpft und durch kleinste Quadrate Zuordnung Mehrfachpunkte bestimmt. Die Kombination von Tripeln zu längeren Sequenzen erfolgt hierarchisch mit einer Überlappung von zwei Bildern. D.h., aus Tripeln werden vier Bilder, aus vier werden sechs, aus sechs zehn, achtzehn, vierunddreißig Bilder, etc.

Zur Beschleunigung der Berechnung werden Bildpyramiden verwendet. Bildpaare werden auf einer Bildgröße von ca.  $100 \times 100$  Pixel orientiert, Bildtripel auf der doppelten und bei größeren Bildern auch auf der vierfachen Größe. Nach der Orientierung der gesamten Sequenz auf dieser Stufe werden am Ende die Punkte durch die Pyramide in die originale Auflösung verfolgt.

Zentraler Bestandteil des vorgestellten Ansatzes ist neben der hoch genauen, auf kleinsten Quadraten basierenden Bildzuordnung die robuste Bündelausgleichung (MCGLONE et al. 2004). Diese wird für jeden Schritt der Orientierung durchgeführt.

Weitere Details zu dem Ansatz und den erzielbaren Genauigkeiten sind in (MAYER 2005) dargestellt. Neuere Ergebnisse (MAYER 2007) zeigen, dass bei Schleifen von fünfzig bis hundert Bildern der Größe fünf Megapixel Genauigkeiten für die Translation im Bereich von unter 1 % des Durchmessers der Schleife und für die Rotation von wenigen hundertstel Grad pro Bild erzielt werden können.

## 4 Unmögliches

Abbildung 1 stellt eine typische geblitzte Aufnahme des photogrammetrischen Nahbereiches dar. Werden in diesem Fall die Codes der Punkte nicht gelesen, so ist jeder Punkt zu jedem anderen zuordnebar. Dies führt z.B. dazu, dass bei zwanzig Punkten, für die nur eine Zuordnung richtig sein kann, nur maximal 5% der Punkte korrekt sein können. Da meist deutlich mehr Punkte im Bild vorhanden sind, erhält man oft unter einem Prozent korrekte Punkte, was bei RANSAC zu vielen Iterationen und einer hohen Unzuverlässigkeit führt.

Insgesamt ist feststellbar, dass bei der im Nahbereich oft gewählten Vorgehensweise von geblitzten völlig überstrahlten Bildern, bei denen praktisch keine Hintergrundtextur vorhanden ist, die oben vorgestellten direkten Verfahren in Kombination mit RANSAC oft eine niedrige Erfolgswahrscheinlichkeit besitzen



Abbildung 1: Typische geblitzte Nahbereichsaufnahme in inverser Darstellung: Ohne Lesen der Kodierung kann jeder Punkt zu jedem anderen zugeordnet werden. Das Bild wurde von der Firma SOLVing3D dankenswerterweise zur Verfügung gestellt.

## 5 Lösungsmöglichkeit

Im Weiteren werden Ergebnisse für eine Szene vorgestellt, die sowohl Bildtextur als auch Messmarken enthält und ein typisches Objekt des photogrammetrischen Nahbereichs, nämlich eine Autotür zeigt. In Abbildung 2 sind die Bilder 12 und 13 der Sequenz dargestellt. Diese wurden, obwohl sie stark gegeneinander verdreht sind, auf Grundlage der Information der Eigenvektoren des Förstner Operators korrekt zugeordnet.





Abbildung 2: Bilder 12 und 13 der Bildsequenz Autotür. Die Bilder wurden von der Firma SOLVing3D dankenswerterweise zur Verfügung gestellt.

Das Ergebnis für insgesamt 23 Aufnahmen ist in Abbildung 3 dargestellt. Es wurde ein  $\sigma_0$  von 0.13 Pixel erzielt. Insgesamt ergaben sich 1580 3-fach, 951 4-fach, 372 5-fach, 252 6-fach, 245 7-fach, 210 8-fach, 141 9-fach, 179 10-fach, 94 11-fach und 14 12-fach Punkte. Hierbei ist zu beachten, dass Punkte nur so lange betrachtet werden, wie sie im nächsten Bild wiedergefunden werden. Punkte, die verloren gehen, werden neu initialisiert. Dieses Vorgehen vermeidet, dass in späteren Bildern verdeckte Punkte in Textur-reichen Bildern halluziniert werden.



Abbildung 3: Ergebnis für die Bildsequenz Autotür, für die die Bilder 12 und 13 in Abbildung 2 dargestellt sind – Ansicht von oben (links) und von der Seite (rechts)

Das Resultat zeigt, dass für die vorgegebenen Bilder, auch bei größeren Rotationen und projektiven Verzerrungen eine Zuordnung mit hoher Genauigkeit möglich ist. Der nächste Schritt, an dem im Moment gearbeitet wird, besteht darin, diese Ergebnisse dazu zu verwenden, um die (unkodierten) Messmarken zwischen den Bildern auf Grund der bekannten Epipolargeometrie sowie von aus den kalibrierten Kameramatrizen ableitbaren Trifokaltensoren zuzuordnen. Dies würde einen Vergleich der erzielbaren Genauigkeiten ermöglichen. Eine Hypothese besteht hierbei darin, dass ähnlich wie bei der automatischen Aerotriangulation die Orientierungen bei genügend Textur auch ohne Messmarken sehr genau bestimmt werden kann, auch wenn die einzelnen Punkte (natürlich) weniger genau bestimmt werden.

## 6 Ausblick

Dieser Beitrag stellt dar, dass es für Bilder mit ausreichend natürlicher Textur möglich ist, ohne Näherungen bei gegebener (genäherter) Kalibrierung ein genaues (relatives) 3D Modell auch bei großen Basen abzuleiten. Als Grundlagen hierfür wurden der 5-Punkt Algorithmus von NISTÉR (2004) und RANSAC vorgestellt. Es wurde gezeigt, wie diese beiden zusammen mit hoch genauer Bildzuordnung von Punkten und der Verknüpfung zu Tripeln und n-fach Punkten zur genauen und verlässlichen Orientierung von Bildsequenzen führen. Darauf aufbauend wurde vorgeschlagen, dies mit (unkodierten) Messmarken zu kombinieren, was den Grad der Automatisierung erhöhen und damit neue Anwendungen eröffnen sollte.

Defizite des Ansatzes bestehen zuerst darin, dass die Ergebnisse nicht Maßstabs-invariant sind. Erfahrungsgemäß sind Unterschiede im Maßstab oft nur bis ca. 30% tolerierbar. Eine Möglichkeit besteht im SIFT Operator (LOWE 2004). Da die Erfahrungen mit der Erweiterung des Förstner Operators in Richtung Rotationsinvarianz gut sind, gibt es Überlegungen, diesen durch Maßstabsraum-Normierung Maßstabs-invariant zu machen. Hierbei soll nicht jeder einzelne Punkt auf verschiedenen Maßstäben zugeordnet, sondern zuerst wie bei der Rotation mittels maximalen Konsenses robust ein Maßstabsunterschied für das Bildpaar bestimmt werden.

Weiterhin ist der Ansatz dahingehend zu erweitern, dass nicht mehr nur Sequenzen, sondern auch flächenhaft verknüpfte Bildverbände orientiert werden können. Dies führt vor allem in Kombination mit Maßstabs- und Rotationsinvarianz zu einer sehr schlechten Kombinatorik, die in ähnlicher Weise angegangen werden soll wie in (SCHAFFALITZKY & ZISSERMAN 2002).

Zuletzt ist als zentraler Punkt dieses Papiers die Kombination des vorgestellten Ansatzes mit Messmarken zu leisten.

## 7 Dank

Wir danken Bernd-Michael Wolf von der Firma SOLVing3D für die Überlassung von Beispielen und für interessante Diskussionen.

#### 8 Literaturverzeichnis

- FISCHLER, M. & BOLLES, R., 1981: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. – Communications of the ACM 24 (6): 381–395.
- FÖRSTNER, W. & GÜLCH, E., 1987: A Fast Operator for Detection and Precise Location of Distinct Points, Corners and Centres of Circular Features. – ISPRS Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken, Schweiz, 281–305.
- HARTLEY, R. & ZISSERMAN, A., 2003: Multiple View Geometry in Computer Vision Second Edition. Cambridge University Press. Cambridge, Großbritannien.
- LHUILLIER, M. & QUAN, L., 2005: A Quasi-Dense Approach to Surface Reconstruction from Uncalibrated Images. – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 27 (3): 418–433.
- Lowe, D., 2004: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. International Journal of Computer Vision **60** (2): 91–110.
- MAYER, H., 2005: Robust Least-Squares Adjustment Based Orientation and Auto-Calibration of Wide-Baseline Image Sequences. – ISPRS Workshop in conjunction with ICCV 2005 "Towards Benchmarking Automated Calibration, Orientation and Surface Reconstruction from Images" (BenCos), Beijing, China, 1–6.
- MAYER, H., 2007: Least-Squares Adjustment Based Markerless Orientation of Wide-Baseline Image Sequences. – Submitted to Photogrammetric Record **26**.
- MCGLONE, J., BETHEL, J. & MIKHAIL, E. (EDITOR), 2004: Manual of Photogrammetry. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing. Bethesda, USA.
- NISTÉR, D., 2004: An Efficient Solution to the Five-Point Relative Pose Problem. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence **26** (6): 756–770.
- POLLEFEYS, M., VAN GOOL, L., VERGAUWEN, M., VERBIEST, F., CORNELIS, K. & TOPS, J., 2004: Visual Modeling with a Hand-Held Camera. – International Journal of Computer Vision 59 (3): 207–232.
- REMONDINO, F. & EL-HAKIM, S., 2006: Image-Based 3D Modelling: A Review. Photogrammetric Record 21 (115): 269–291.
- SCHAFFALITZKY, F. & ZISSERMAN, A., 2002: Multi-view Matching for Unordered Images Sets, or "How Do I Organize My Holiday Snaps?". – Seventh European Conference on Computer Vision, Volume I, 414–431.

# Kombinierte Bündelblockausgleichung mit Varianzkomponentenschätzung bei der Fusion terrestrischer Laserscannerdaten, Panorama- und zentralperspektivischer Bilddaten

#### DANILO SCHNEIDER<sup>\*</sup>

Zusammenfassung: Bisherige Ansätze zur Kombination terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten verwenden die Bildinformationen meist nur sekundär (z.B. Kolorierung von Punktwolken bzw. Texturierung). Bei konsequenter Nutzung der komplementären Eigenschaften beider Sensortypen können sich iedoch Laserscanner und Kamera in der Auswertung gegenseitig stützen. Zu diesem Zweck wurde eine Bündelblockausgleichung für die gemeinsame Ausgleichung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bild- bzw. Panoramabilddaten, auf Basis der jeweiligen geometrischen Modelle, entwickelt. Da es sich um unterschiedliche Typen von Beobachtungen handelt, ist es notwendig, den Messungen verschiedene Gewichte zuzuordnen (stochastisches Modell). Zu diesem Zweck wurde das Verfahren der Varianzkomponentenschätzung implementiert. Dadurch werden die jeweiligen Eigenschaften der Messdaten (z.B. laterale Genauigkeit der Bildkoordinaten, Zuverlässigkeit der Streckenmessung) genutzt, um die 3D-Koordinaten von Objektpunkten zu bestimmen und gleichzeitig die beteiligten Messgeräte zu kalibrieren (Selbstkalibrierung). Außerdem wird eine Aussage über die Genauigkeit der beteiligten Messungen möglich und meist eine Verbesserung der Ausgleichungsergebnisse erreicht. Der vorliegende Beitrag beschreibt die zugrunde liegenden geometrischen Modelle, sowie die kombinierte Bündelblockausgleichung mit Varianzkomponentenschätzung. Es werden erste Ergebnisse, basierend auf Daten, die in einer 360°-Testumgebung aufgenommen worden sind, vorgestellt und bewertet.

### 1 Einleitung

Die kombinierte Auswertung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten wird heutzutage von mehreren Softwarepaketen unterstützt, da die Kombination dreidimensionaler Punktwolken und hochauflösender Bilder aufgrund der weitgehend komplementären Natur der Daten viel versprechende Möglichkeiten bietet. Aus diesem Grunde wird von mehreren Herstellern terrestrischer Laserscanner eine digitale Kamera auch hardwareseitig im Laserscannersystem integriert (MULSOW et.al., 2004). Meistens stellt dabei der Laserscanner die Hauptkomponente dar, während die Bildinformationen nur sekundär zur nachträglichen Kolorierung der 3D-Punktwolke, zur Texturierung einer Oberfläche oder zur besseren Orientierung innerhalb der Laserscanner-Daten dienen. Weiterhin wurde in bisherigen Ansätzen die Verwendung von Bildern zur automatischen Registrierung von Laserscannerdaten vorgeschlagen (AL-MANASIR & FRASER, 2006; DOLD & BRENNER, 2006), sowie die automatische Generierung von Orthobildern auf Grundlage von Bild- und Entfernungsdaten beschrieben. Bei (REULKE, 2006) werden die Entfernungsdaten anstelle des Laserscanners mit einer distanzmessenden Kamera aufgenommen.

Danilo Schneider, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden, Helmholtzstraße 10, 01062 Dresden, e-mail: danilo.schneider@tu-dresden.de

Eine kombinierte Auswertung terrestrischer Laserscanner und photogrammetrischer Bilddaten bietet jedoch ein weitaus größeres Potenzial (JANSA et.al., 2004; WENDT & HEIPKE, 2006). Bei konsequenter Nutzung der komplementären Eigenschaften der beiden Sensortypen im Rahmen einer gemeinsamen Ausgleichung können sich Laserscanner und Kamera bei der Bestimmung von Objektgeometrien und bei der Kalibrierung gegenseitig stützen (ULLRICH, et.al., 2003).

Besonders viel versprechend ist die Verwendung hochauflösender Kameras in einem kombinierten System, da damit höhere Genauigkeiten senkrecht zur Aufnahmerichtung zu erwarten sind, als die Winkelmessgenauigkeit des Laserscanners. Angepasst an die Funktionsweise der meisten Scanner, die ein horizontales Gesichtsfeld von 360° abdecken, bietet sich insbesondere die Nutzung von Panoramakameras an. Panoramakameras besitzen oft eine hohe Auflösung und damit ein großes Genauigkeitspotenzial bei der Bestimmung von 3D-Objektkoordinaten (LUHMANN & TECKLENBURG, 2004; SCHNEIDER & MAAS, 2005)

Basierend auf den geometrischen Modellen von Laserscanner und Kamera, sowie auf dem am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Dresden entwickelten geometrischen Modell einer Panoramakamera (SCHNEIDER & MAAS, 2006) wurde eine kombinierte Bündelblockausgleichung für die gemeinsame Ausgleichung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bild- bzw. Panoramabilddaten implementiert.

Da es sich dabei um verschiedene Typen von Beobachtungen handelt, ist es notwendig, den unterschiedlichen Beobachtungen bei der gemeinsamen Ausgleichung unterschiedliche Gewichte zuzuordnen. Dies kann entweder in Form fester Werte erfolgen oder die Gewichte werden im Zuge der Ausgleichung durch eine Varianzkomponentenschätzung automatisch bestimmt, wodurch die jeweiligen Eigenschaften der beteiligten Messgeräte optimal ausgenutzt werden und zudem oft eine Verbesserung der Ausgleichungsergebnisse erreicht wird (KLEIN, 2001; SIEG & HIRSCH, 2000). Ergebnisse der Varianzkomponentenschätzung bei der kombinierten Ausgleichung von Laserscanner- und Bilddaten werden auch in (HARING, et. al., 2003) vorgestellt.

In diesem Beitrag wird die Implementierung der kombinierten Bündelblockausgleichung mit Varianzkomponentenschätzung vorgestellt und anhand mehrerer Laserscanneraufnahmen, Bilder und Panoramabilder eines 360°-Testfeldes an der TU Dresden analysiert.

### 2 Geometrische Modelle

Vorraussetzung für die gemeinsame Auswertung verschiedener Messgeräte (Kamera, Panoramakamera, Laserscanner) ist die Kenntnis der zugrunde liegenden geometrischen Modelle sowie deren mathematische Beschreibung. Dies ermöglicht zum einen die Berechnung von Objektinformationen (z.B. Koordinaten von Objektpunkten) unter Nutzung der verschiedenen Messungen (Bildkoordinaten, Strecke, Winkel) und zum anderen erlaubt es die Kalibrierung der Messgeräte sofern die Modelle entsprechende Zusatzparameter beinhalten.

Kameras mit Flächensensoren entsprechen dem bekannten Modell der Zentralperspektive (vgl. Abb. 1, links). Mathematisch wird dieser Zusammenhang durch die Kollinearitätsgleichungen beschrieben. Üblicherweise werden diese Abbildungsgleichungen durch Korrekturterme erweitert, die zusätzliche Parameter, u.a. zur Korrektur der Objektverzeichnung, enthalten.



Abb. 1: Geometrisches Modell zentralperspektivischer und panoramischer Bilddaten

Panoramakameras erlauben die Aufnahme sehr großer horizontaler Öffnungswinkel (bis zu 360°) in einem Bild, was besonders für die Aufnahme von Räumen oder komplexen Anlagen von Vorteil ist. Technisch wird dies meist durch eine rotierende Sensorzeile realisiert. Panoramakameras bieten ein hohes Auflösungs- und damit auch Genauigkeitspotenzial. Die Panoramaabbildung lässt sich jedoch nur noch in einer Bildkoordinatenrichtung mit dem Modell der Zentralperspektive beschreiben. Geometrisch lässt sich der Abbildungsvorgang durch die Projektion auf einen Zylindermantel (Abb. 1, rechts) darstellen (AMIRI PARIAN, 2007; LUHMANN & TECKLENBURG, 2004; SCHNEIDER & MAAS 2006). Die Abbildungsgleichungen für zentralperspektivische und panoramische Bilder lauten wie folgt:

$$\begin{aligned} x' &= x_{0}' - \frac{c \cdot x}{z} + dx' & x'_{pano} = x_{0}' - c \cdot \arctan\left(\frac{-y}{x}\right) + dx'_{pano} \\ y' &= y_{0}' - \frac{c \cdot y}{z} + dy' & y'_{pano} = y_{0}' - \frac{c \cdot z}{\sqrt{x^{2} + y^{2}}} + dy'_{pano} \end{aligned}$$
(1)

Die Umrechnung in ein einheitliches übergeordnetes Koordinatensystem erfolgt durch:

$$x = r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)$$
  

$$y = r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)$$
  

$$z = r_{13}(X - X_0) + r_{33}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)$$
(2)

Die Additionsterme dx', dy' sowie  $dx'_{pano}$  und  $dy'_{pano}$  enthalten Zusatzparameter zur Korrektur systematischer Effekte, die durch die physikalischen Eigenschaften der Aufnahmegeräte hervorgerufen werden.

Ursprüngliche Messdaten terrestrischer Laserscanner sind sphärische Koordinaten, d.h. Strecke, Horizontal- und Vertikalwinkel. Entsprechend lässt sich das geometrische Modell durch die Umrechnung kartesischer in sphärische Koordinaten (Gleichung 3) ausdrücken. Durch die Anwendung von Gleichung 2 wird das lokale Laserscanner-Koordinatensystem in das gemeinsame übergeordnete System integriert.
Ebenso wie beim Kameramodell können beim geometrischen Modell terrestrischer Laserscanner Zusatzparameter in den Korrekturtermen dD,  $d\alpha$  und  $d\beta$  berücksichtigt werden, die individuelle Eigenschaften der jeweiligen Scannertypen erfassen und deren Kalibrierung erlauben. Jedoch besteht bei der Kalibrierung terrestrischer Laserscanner die Schwierigkeit, dass bereits durch den Hersteller im Scanner geometrische Korrekturen angebracht werden und das zu Grunde liegende geometrische Modell nicht bekannt ist. Entsprechend lassen sich meist keine signifikanten systematischen Effekte in den Residuen der Beobachtungen erkennen. Bisher wurde deshalb nur ein Maßstabs- (k<sub>S</sub>) und ein Offset-Parameter (k<sub>0</sub>) im geometrischen Modell verwendet (Gleichung 4), jedoch keine Korrekturen an Horizontal- und Vertikalwinkel angebracht.



Abb. 2: Geometrisches Modell Laserscanner

### 3 Integrierte Bündelblockausgleichung

Bei der Bündelblockausgleichung im ursprünglichen Sinne werden beliebig viele im Raum angeordnete Bilder simultan rechnerisch orientiert. Als Messwerte dienen die im Bild gemessenen Koordinaten von Objektpunkten. Resultat der Berechnung sind neben den Orientierungselementen der Bilder auch die Koordinaten der Objektpunkte. Erweitert man diesen Ansatz auf die kombinierte Bündelblockausgleichung, bedeutet das die gleichzeitige rechnerische Einpassung aller Aufnahmen (Bilder, Panoramas, Punktwolken) der beteiligten Messgeräte (Kamera, Panoramakamera, Laserscanner). Die Berechnung erfolgt unter der Forderung, dass sich alle Strahlen zwischen Objektpunkt und Messgerät optimal in einem Objektpunkt schneiden.

Als Beobachtungen gehen die sphärischen Koordinaten von mit dem Laserscanner gemessenen Objektpunkten und die mit einer Kamera bzw. Panoramakamera gemessenen Bildkoordinaten in eine gemeinsame Koeffizientenmatrix ein. Abb. 3 (links) zeigt die Struktur einer Koeffizientenmatrix eines synthetischen Beispiels. Die Berechnung erfolgt als Ausgleichung nach kleinsten Quadraten (MkQ-Schätzung), das Resultat sind die Koordinaten der Objektpunkte, die Position und Orientierung aller beteiligten Aufnahmen, die Kalibrierparameter der Aufnahmegeräte und statistische Größen zur Beurteilung der Korrelationen und Genauigkeiten.



Abb. 3: Struktur der Designmatrix (Beispiel) und Benutzerdialog

Zur Berechnung der Bündelblockausgleichung wurde am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Dresden eine Software entwickelt, die außerdem den Import der entsprechenden Koordinatendateien (sphärische Koordinaten der Laserscans und Bildkoordinaten), den Import einer Parameterdatei mit Näherungswerten für die zu schätzenden Parameter, sowie den Export einer Ergebnisdatei und einer VRML-Datei erlaubt. Während die Ergebnisdatei alle Berechnungsergebnisse und statistischen Größen enthält, ist die VRML-Datei eine grafische Visualisierung des Resultates. Alle Einstellungen werden vor der Berechnung der Ausgleichung in einem grafischen Benutzerdialog angezeigt und können gegebenenfalls verändert werden (vgl. Abb. 3, rechts). Zur Ausreißerelimination wurde bisher das Datasnooping-Verfahren nach (BAARDA, 1968) in die Berechnung integriert.

Zum Testen der kombinierten Bündelblockausgleichung wurde in einem Innenhof der TU Dresden ein 360°-Testfeld eingerichtet. Der Innenhof ist ca.  $45 \times 45$  m<sup>2</sup> groß, an die etwa 20 m hohen Fassaden der angrenzenden Gebäude wurden ca. 100 retro-reflektierende Zielmarken verteilt. Für die Laserscans wurde ein Riegl LMS-Z420i verwendet, der softwareseitig die Bestimmung der Zielmarkenmittelpunkte mittels Schwerpunktoperator im Intensitätsbild erlaubt. Weiterhin wurden mehrere Bilder mit der Panoramakamera Eyescan M3D, sowie zahlreiche Bilder mit den digitalen Spiegelreflexkameras Kodak DCS 14n und Nikon D 100 aufgenommen. Die Zielmarkenmittelpunkte wurden in den mit Blitzlicht aufgenommenen Bildern mit Schwerpunkt- bzw. Ellipsenoperator gemessen.

#### 3.1 Beispiel 1

Dieses Testbeispiel zeigt die Berechnung der räumlichen Koordinaten von 10 Objektpunkten an einer Fassade des o.g. Testfeldes im Rahmen der kombinierten Bündelblockausgleichung mit insgesamt 2 Laserscanner-Standpunkten und 2 Standpunkten der Panoramakamera. Die Aufnahmen wurden schrittweise in verschiedenen Konstellationen der Berechnung hinzugefügt und die Standardabweichung der ausgeglichenen Objektkoordinaten analysiert.

Anzahl Scans	Anzah l Pano- ramen	^ (mm)	^ (mgon)	^ (pixel)	RMS <sub>x</sub> (mm)	RMS <sub>v</sub> (mm)	RMS <sub>z</sub> (mm)
1	-	7,45	4,92	-	2,82	6,83	3,36
1*	-	5,56	4,91	- 2,5	55	5,22	2,93
-	2	-	-	0,55	4,18	14,15	4,99
1	1	5,56	4,85	0,59	2,25	5,07	2,61
1	2	5,84	4,88	0,62	1,96	4,81	2,51
2	-	6,87	6,30	- 2,5	53	4,83	2,95
2	1	6,48	5,65 0	,68	2,12	4,472	2,51
2	2	6,21	5,42 0	,65	1,91	4,33	1,88

Tab. 1: Berechnungsergebnisse für verschiedene Aufnahmekonstellationen



Abb. 4: Aufnahmekonstellation (schematisch, Grundriss der Testumgebung)

Durch die Berechnung der Objektkoordinaten auf Grundlage von nur 2 Panoramabildern wurde in dem vorliegenden Beispiel eine schlechtere Genauigkeit (v.a. in Aufnahmerichtung Y) erreicht als mit einer Laserscanneraufnahme, was mit einer relativ schlechten Strahlenschnittgeometrie zu begründen ist. Außerdem konnte das Potenzial der hochauflösenden Panoramakamera nicht ausgenutzt werden, da die signalisierten Punkte nicht aktiv beleuchtet wurden und damit die Bildkoordinatenmessung als kritisch zu bewerten ist. Dennoch wird bei einer Kombination beider Geräte (bereits bei einem Scan und einer Panroamaaufnahme) eine Genauigkeitssteigerung erreicht. Generell zeigt sich, dass das Hinzufügen weiterer Aufnahmen (Scan und/ oder Panorama) eine Verbesserung der Genauigkeit (vgl. Tab. 1: RMS der Standardabweichungen der geschätzten Objektpunktkoordinaten) bewirkt. Während die Messungen des Laserscanners die Genauigkeit in Tiefenrichtung verbessern, bewirken die Messwerte der Panoramakamera eine Steigerung der Genauigkeit in Lagerichtung. Werden weitere Aufnahmen hinzugefügt, verringern sich die RMS-Werte entsprechend, wenn auf gute Strahlenschnittwinkel geachtet wird. Unabhängig von diesen Berechnungsergebnissen ist zu erwähnen, dass die Laserscannerdaten bereits gute Näherungswerte für die Objektkoordinaten liefern, zudem das photogrammetrische Netz insbesondere durch die Streckenmessung stützen und damit auch die Zuverlässigkeit der Koordinatenbestimmung erhöhen.

#### 3.2 Beispiel 2

Ein weiteres Berechnungsbeispiel soll zeigen, ob frei gehaltene Bilder einer Spiegelreflexkamera die Bilder einer Panoramakamera gleichwertig ersetzen können bzw. ob durch die zusätzliche Verwendung zentralperspektivischer Bilder eine Genauigkeitssteigerung möglich ist. Dazu wurden neben 4 Laserscans und 5 Panoramabildern insgesamt 62 Bilder mit der digitalen Spiegelreflexkamera Kodak DCS 14n aufgenommen. Die Anordnung der Aufnahmen erfolgte im Hinblick auf eine gute Strahlenschnittgeometrie. Außerdem wurden weitere Bilder der Kame-

mit Berücksichtigung eines Maßstabs- und Offsetparameters entspr. Gleichung (4)

ra Nikon D100, die fest auf dem Riegl Laserscanner fixiert ist, in die Berechung integriert. Abbildung 5 zeigt die Aufnahmekonfiguration schematisch.



Abb. 5: Aufnahmekonstellation (schematisch, Grundriss der Testumgebung) und beteiligte Geräte (Riegl Laserscanner Z420i, Panoramakamera Eyescan M3, Kodak DCS 14n, Nikon D100)

Anzahl Scans	Anzahl Pano- ramen	Anzahl z Bil <i>Kodak</i>	zentralp. der Nikon	Unbek. Objekt- punkte	^ (mm)	^ (mgon)	^ (pixel)	^ (pixel)	RMS <sub>x</sub> (mm)	RMS <sub>y</sub> (mm)	RMS <sub>z</sub> (mm)
3	-	-	-	35	5,22	5,62	-	-	2,28	2,19	1,75
3	4	-	-	35	5,19	5,45	0,59	-	1,89	1,67	1,26
3	-	18	-	35	5,27	5,76	-	0,30	1,86	2,08 1,	55
3	-	-	18	35	5,19	5,70	-	0,18	1,81	2,04 1,	52
3	4	18	-	35	5,23	5,55 0,	59	0,29	1,51	1,62 1,	12
3	4	-	18	35	5,20	5,63 0,	60	0,19	1,50	1,61 1,	12
3	-	18	18	35	5,24	5,79	-	0,24	1,80	2,03 1,	49
4	5	62	42	8	5,59	5,91 0,	63	0,25	0,49	1,12 0,	60

Tab. 2: Berechnungsergebnisse für verschiedene Aufnahmekonstellation

Die Ergebnisse dieses Berechnungsbeispiels (Tab. 2) zeigen, dass die Berücksichtigung zusätzlicher Aufnahmen (Panoramen oder zentralperspektivische Bilder) die Genauigkeit der berechneten Ergebnisse generell verbessern können. In der Praxis könnte dies bedeuten, dass der Nutzer während der Aufnahme der Laserscans zusätzliche Bilder unter günstigen Schnittwinkeln aufnimmt und diese später in die Auswertung integriert. In gleicher Weise können die Bilder einer auf dem Scanner montierten Kamera (Nikon D100) bzw. einer im Scanner integrierten Kamera zu einer Verbesserung der Genauigkeit beitragen. Die hohe Anzahl zusätzlicher Bilder der letzten Berechnung in Tabelle 2 ist zwar in der Praxis nicht effektiv, zeigt aber das Genauigkeitspotenzial der kombinierten Bündelblockausgleichung.

## 4 Varianzkomponentenschätzung

Bei der kombinierten Bündelblockausgleichung werden unterschiedliche Typen von Beobachtungen gleichzeitig verwendet, um die unbekannten Parameter zu schätzen. Aus diesen Gründen ist es notwendig, den Beobachtungsgruppen (Bildkoordinaten in zentralperspektivischen und panoramischen Bilddaten, Distanzmessung des Laserscanners, Winkelmessung des Laserscanners) angemessene Gewichte zuzuordnen. Die Definition von Gewichten kann dabei in Form fester Werte erfolgen, wenn a priori Standardabweichungen der Messungen, z.B. aus Herstellerangaben, oder Erfahrungswerte vorliegen. Dabei wird jedoch der Informationsgehalt der Beobachtungen nicht voll ausgeschöpft. Durch das Verfahren der Varianzkomponentenschätzung ist es möglich, optimale Gewichte für die einzelnen Beobachtungsgruppen sowie die Standardabweichungen der Beobachtungen im Zuge der eigentlichen Bündelblockausgleichung zu schätzen. Dadurch wird zum einen eine Aussage über die Genauigkeit der einzelnen Messungen möglich und zum anderen wird meist eine Verbesserung der Ausgleichungsergebnisse erreicht, da die jeweiligen Eigenschaften der beteiligten Messgeräte optimal ausgenutzt werden (KLEIN, 2001; SIEG & HIRSCH, 2000). Werden die Horizontal- und die Vertikalwinkelmessung des Laserscanners, sowie die horizontalen und vertikalen Bildkoordinaten der Panoramakamera in verschiedene Beobachtungsgruppen aufgeteilt, lassen sich zusätzlich Aussagen über die Charakteristik der Messgeräte treffen. Darüber hinaus können auch Messgeräte mit unterschiedlichen Genauigkeiten berücksichtigt werden.

Die Gewichte  $p_i$  der Beobachtungen werden durch den Quotienten der Varianz der Gewichtseinheit  $\sigma_0^2$  und der Varianz der Beobachtung  $\sigma_i^2$ , die meist aus Herstellerangaben oder Erfahrungswerten entnommen werden, festgelegt. Für  $\sigma_0$  wird ein fester Wert vorgegeben (z.B. 0,01 in den folgenden Berechnungsbeispielen). Die Standardabweichung der Ausgleichung  $\hat{\sigma}_0$  zeigt dann, ob die Gewichte bzw. die a-priori-Standardabweichungen der Beobachtungen zu pessimistisch ( $\hat{\sigma}_0 < \sigma_0$ ) oder zu optimistisch ( $\hat{\sigma}_0 > \sigma_0$ ) veranschlagt wurden. Bei der Verarbeitung von Beobachtungen gleichen Typs berechnet sich die Varianz-Kovarianz-Matrix  $\Sigma$  aus dem Produkt  $\sigma_0^2$  und der Kofaktor-Matrix Q. Werden unterschiedliche Beobachtungsgruppen gemeinsam ausgeglichen wird die Matrix  $\Sigma$  in Komponenten  $\Sigma_i=\sigma_i^2 Q_i$  aufgespalten. Die Faktoren  $\sigma_i^2$  sind die zu schätzenden Varianzkomponenten und repräsentieren die a-priori-Messunsicherheiten der einzelnen Beobachtungsgruppen. Die Berechnung erfolgt nach (KoCH, 1997).

Berechnungs- beispiel	Bemerkung zur Gewichtung	^ 0	RMS <sub>x</sub> (mm)	RMS <sub>v</sub> (mm)	RMS <sub>z</sub> (mm)	RMS <sub>xvz</sub> (mm)
1	Überbetonung Streckenmessung	0,01309	1,78	1,78	2,03 3,2	3
2	Überbetonung Winkelmessung	0,01479	2,03	2,62	1,33 3,5	7
3	Überbetonung Panorama	0,01320	2,12	2,31	1,32 3,4	0
4	Überbetonung zentralpersp. Bilder	0,01061	2,68	3,05 1,9	4 4,50	
5	Ausgewogen, aber zu pessimistisch	0,00573	1,58	1,71 1,1	6 2,60	
6	Ausgewogen, aber zu optimistisch	0,02296	1,63	1,83 1,1	5 2,71	
7	Sehr gute feste Gewichte	0,01046	1,59	1,74 1,1	9 2,64	
8 (VKS)	VKS, 4 Gruppen	0,01000	1,51	1,64	1,13 2,5	0
9 (VKS)	VKS, 5 Gruppen (, getrennt)	0,01000	1,56	1,68 1,0	4 2,52	
10 (VKS)	VKS, 5 Gruppen (x <sub>p</sub> ', y <sub>p</sub> ' getrennt)	0,01000	1,47	1,60 1,1	6 2,46	
11 (VKS)	VKS, 6 Gruppen	0,01000	1,52	1,63	1,05 2,4	6
12 (VKS)	VKS, 7 Gruppen	0,01000	1,52	1,63 1,0	5 2,46	

Tab. 3: Kombinierten Bündelblockausgleichung mit unterschiedlichen stochastischen Modellen

In Tab. 3 bzw. Tab. 4 sind die Ergebnisse 12 verschiedener Berechnungsbeispiele aufgeführt, die ersten 4 mit ungünstiger Gewichtung der Beobachtungen. Die Gewichtung in Beispiel 5 und 6 ist zwar ausgewogen aber insgesamt zu pessimistisch bzw. zu optimistisch. Im Berechnungsbeispiel 7 wurden ausgewogene realistische Gewichte als feste Werte vorgegeben. In die Berechnungen 8-12 wurde eine Varianzkomponentenschätzung integriert, jeweils mit unterschiedlichen Gruppierungen der Beobachtungen. Prinzipiell ist zu erkennen, dass die Varianzkomponentenschätzung zur Verbesserung der Genauigkeit beitragen kann, vor allem dann, wenn die Genauigkeiten der beteiligten Messgeräte nur unzureichend a priori bekannt sind.

Standardabw. der Beobach-	Unausgewogene Gewichte			Zu optimistisch/ zu pessimistisch			Varianzkomponentenschätzung					
tungen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Strecke in mm	(2,0) 2,0	(10,0) 14,8	(10,0) 13,2	(10,0) 10,6	(10,0) 5,73	(3,0) 6,89	(5,3) 5,54	(7,5) 5,23	(7,5) 5,21	(7,5) 5,24	(7,5) 5,22	(7,5) 5,23
Horizontal- winkel in mgon Vertikalwinkel in mgon	(10,0) 13,1	(2,0) 3,0	(10,0) 13,2	(10,0) 10,6	(10,0) 5,73	(2,0) 4,59	(5,6) 5,86	(10,0) 5,57	$(10,0) \\ 4,23 \\ (10,0) \\ 6,61$	(10,0) 5,58	$(10,0) \\ 4,21 \\ (10,0) \\ 6,64$	$(10,0) \\ 4,21 \\ (10,0) \\ 6,64$
Panorama x <sub>p</sub> ' in Pixel Panorama y <sub>p</sub> ' in Pixel	(1,00) 1,31	(1,00) 1,48	(0,25) 0,38	(1,00) 1,06	(1,00) 0,57	(0,25) 0,66	(0,6) 0,63	(0,5) 0,60	(0,5) 0,60	(0,5) 0,52 (0,5) 0,66	(0,5) 0,52 (0,5) 0,66	$(0,5) \\ 0,52 \\ (0,5) \\ 0,66$
Zentralp. Bild x' in Pixel Zentralp. Bild v'	(0,5) 0,65	(0,5) 0,74	(0,5) 0,66	(0,12) 0,13	(0,5) 0,29	(0,12) 0,29	(0,24) 0,25	(0,2) 0,24	(0,2) 0,24	(0,2) 0,24	(0,2) 0,24	$(0,2) \\ 0,26 \\ (0,2) \\ 0.23$

Tab. 4: Kombinierten Bündelblockausgleichung mit unterschiedlichen stochastischen Modellen (in Klammern: Standardabweichung für die a priori Festlegung der Beobachtungsgewichte, darunter die geschätzten a-priori-Standardabweichungen der Beobachtungen)

Tab. 4 zeigt außerdem, dass es möglich ist, durch die Berechnung mit Varianzkomponentenschätzung die Genauigkeit der beteiligten Beobachtungen – weitestgehend unabhängig von der Festlegung von Näherungsgewichten – zu schätzen. Darüber hinaus können auch Rückschlüsse auf Unterschiede in Horizontal- und Vertikalwinkelmessung beim Laserscanner, sowie auf Unterschiede in der Genauigkeit horizontaler und vertikaler Bildkoordinaten, insb. bei Panoramakameras gezogen werden. Zukünftig soll die Unterteilung in weitere Beobachtungsgruppen (z.B. bei Verwendung unterschiedlicher Kameras oder Scans unterschiedlicher Auflösung, Aufspaltung in konstante und streckenabhängige Varianzkomponenten) untersucht werden. Außerdem ist die Implementierung und Analyse der freien Ausgleichung (ohne Passpunkte) mit Varianzkomponentenschätzung vorgesehen. Um realistische Angaben zur Genauigkeit des vorgestellten Verfahrens machen zu können, wären zudem unabhängige Testmessungen bzw. ein Vergleich der in der Ausgleichung geschätzten Objektpunktkoordinaten mit unabhängigen, möglichst übergeordnet genau gemessenen, Objektpunktkoordinaten sinnvoll.

Die eingeklammerten Standardabweichungen bei den Berechnungen mit Varianzkomponentenschätzung dienen nur zur Festlegung von Näherungswerten der Beobachtungsgewichte.

## 5 Literaturverzeichnis

- AL-MANASIR, K. & FRASER, C., 2006: Automatic registration of terrestrial laserscanner data via imagery. Proceedings ISPRS Com. V Symposium, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 5.
- AMIRI PARIAN, J., 2007: Sensor modelling, terrestrial panoramic camera calibration and closerange photogrammetric network analysis. Dissertation ETH Zürich.
- BAARDA, W., 1968: A testing procedure for use in geodetic networks. Netherlands Geodetic Commission, Vol. 2, No. 5, Delft.
- DOLD, C. & BRENNER, K., 2006: Registration of terrestrial laser scanning data using planar patches and image data. International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 5.
- HARING, A.; BRIESE, M.; PFEIFER, N., 2003: Modellierung terrestrischer Laserscanner-Daten am Beispiel der Marc-Anton-Plastik. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 91. Jahrgang (2003), 4: 288-296.
- JANSA, J.; STUDNICKA, N.; FORKERT, G.; HARING, A.; KAGER, H., 2004: Terrestrial laserscanning and photogrammetry – acquisition techniques complementing one another. Intern. archives of Photogrammetry, Remote Sensing, Spatial Information Sciences. Vol. XXXV, Part B5.
- KLEIN, B., 2001: Untersuchungen zur Feldprüfung geodätischer Instrumente mittels Varianzkomponentenschätzung. Diplomarbeit, Technische Unversität Darmstadt, unveröffentlicht.
- KOCH, K.-R., 1997: Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen. Dümmler Verlag, Bonn, 3. Auflage.
- LUHMANN, T. & TECKLENBURG, W., 2004: 3-D object reconstruction from multiple-station panorama imagery. Panoramic Photogrammetry Workshop. International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXIV, 5/W16.
- MULSOW, C.; SCHNEIDER, D.; ULLRICH, A.; STUDNICKA, N., 2004: Untersuchungen zur Genauigkeit eines integrierten terrestrischen Laserscanner-Kamerasystems. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004: 108-113, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- REULKE, R., 2006: Combination of distance data with high resolution images. Image Engineering and Vision Metrology, Proceedings ISPRS Com. V Symposium, International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 5.
- SCHNEIDER, D. & MAAS, H.-G., 2005: Combined bundle adjustment of panoramic and central perspective images. International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 5/W8.
- SCHNEIDER, D. & MAAS, H.-G., 2006: A geometric model for linear-array-based terrestrial panoramic cameras. The Photogrammetric Record, 21(115): 198-210, Blackwell Publishing Ltd., Oxford, UK.
- SIEG, D. & HIRSCH, M., 2000: Varianzkomponentenschätzung in ingenieurgeodätsichen Netzen; Teil 1: Theorie. Allgemeine Vermessungsnachrichten, 3/2000: 82-90.
- ULLRICH, A.; SCHWARZ, R.; KAGER, H., 2003: Multistationsausgleichung für ein Laserscanner-System mit aufgesetzter Kamera. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), 91. Jahrgang (2003), 4: 281-287.
- WENDT, A. & HEIPKE, C., 2006: Simultaneous orientation of brightness, range and intensity images. International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI, Part 5.

# Mehrmedienphotogrammetrie an schwer zugänglichen, komplexen Körpern

## TORSTEN PUTZE<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Für verschiedene Anwendungen war und ist es unumgänglich, durch unterschiedlich lichtbrechende Medien hindurch zu beobachten. Im vorliegenden Fall sollen Phänomene im Wasser in einem Plexiglasquader mit zylindrischer Innenbohrung beobachtet werden. Bisher entwickelte Ansätze planparalleler Trennflächen sind nicht mehr umsetzbar. Auf Grund der geringen Größe und der komplexen Struktur ist zunächst ein schrittweiser Ansatz für die Kalibrierung und Orientierung gewählt. Das System der Kameras wird relativ zueinander orientiert und es werden die Parameter der inneren Orientierung und der Verzeichnung bestimmt. Ebenso werden die geometrischen Parameter des Mehrmedienkörpers vorab bestimmt. Die Zusammenführung beider Systeme erfolgt über Verknüpfungspunkte. Die Bildpunkte jeder Kamera gehen via Raytracing in Raumstrecken über, die für jeweils ein Medium Gültigkeit besitzen. Die Zuordnung homologer Punkte geschieht nicht mehr auf der Basis von Kernlinien im Bildraum, sondern im Objektraum, basierend auf den Raumstrecken.

# 1 Einleitung

Der Einsatz bildbasierter Methoden zur Ermittlung von statischen oder dynamischen Geometrien bezieht sich zum Großteil auf Einmedienprobleme, d.h. zwischen dem Objektiv und den zu messenden Marken ist Luft das einzige Medium. Die hierzu notwendigen mathematischen Modelle und Vorgehensweisen sind hinreichend oft beschrieben. Sollen Phänomene in abgeschlossenen Behältnissen oder anderen Medien mit Hilfe optischer Verfahren analysiert und ausgewertet werden, ist das Standardmodell nicht mehr ohne weiteres anzuwenden. Beispiele für solche Anordnungen sind unter anderem:

- · Geometrische Analysen von Objekten in Kammern mit hoher Temperatur und Druck
- Wasserströmung hinter planparallelen Trennflächen aus Plexiglas
- Unterwasserphotogrammetrie durch bewegte Gewässeroberflächen
- · Wasserströmung innerhalb eines komplexen Objektes

Im vorliegenden Fall sollen Strömungsphänomene in einem Zylinder analysiert werden. Die Ausmaße des Probekörpers sind 11,5 x 11,5 x 10 cm<sup>3</sup>. Im Inneren ist ein Zylinder mit einem Durchmesser von 7,5 cm gebohrt. Das Modell ist aus Plexiglas gefertigt und wird für die späteren Versuche mit Wasser befüllt. Für die Vorversuche und die Entwicklung der Algorithmen ist der Zylinder ebenfalls mit Luft gefüllt. Eine Skizze des Modells mit der eingesetzten Kamerakonfiguration ist in Abbildung 1 zu sehen.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Torsten Putze: Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden, Deutschland



Abbildung 1: Darstellung des Messaufbaus und des Modells

## 1.1 Bisherige Ansätze

In manchen Versuchsaufbauten kann durch Index Matching (z.B. BUDWIG, 1994) das mathematische Modell für gewöhnliche Anwendungen in Luft erhalten werden. Hierbei werden alle Medien so gewählt, dass für den gesamten Strahlengang ein einziger Brechungsindex gilt. Vor allem wird die Luft durch eine Flüssigkeit mit erhöhtem Brechungsindex ersetzt. Es ist jedoch nicht möglich, alle Aufnahmesysteme mittels Index Matching anzupassen. Dann muss der Effekt der Brechung (HENTSCHEL, 2001) mit berücksichtigt werden.

Es gab in der Vergangenheit verschiedene Ansätze, die den Mehrmediendurchgang modelliert haben. Auf Grund der Komplexität der Brechung kamen zumeist planparallele Trennflächen zum Einsatz (z.B. MAAS et. al, 1993). Solche Trennflächen bewirken einen radialen Versatz der Bildpunkte vom Nadirpunkt aus. Dieser Versatz kann als zusätzlicher Korrekturterm, wie in MAAS (1995) angebracht werden. Ein einfacher Korrekturterm für die Verwendung bei parallelwandigen Regelflächen oder zusammengesetzten Flächenelementen ist auf Grund der ortsabhängigen Normalenvektoren nicht ohne weiteres darstellbar.

Im Fall der Unterwasserphotogrammetrie ist die Annahme einer ebenen Trennfläche nur ungenügend geeignet. Daher beschreibt OKAMOTO (1982) ein Wellenmodell als Grundlage, dessen Parameter jedoch nur sehr schwer exakt modelliert werden können.

## 1.2 Spezielle Anwendung

In KOTOWSKI (1987) wurde ein allgemeingültiger Ansatz für beliebig parametrisierbare Trennflächen aufgestellt. Mit genügend zusätzlichen Beobachtungen können alle benötigten Parameter innerhalb einer Bündelblockausgleichung bestimmt werden. Für die ersten Schritte mit einer solchen komplexen Versuchsanlage soll die sequentielle Abarbeitung der notwendigen Schritte vorerst genügen. Die Einzelschritte teilen sich wie folgt auf:

- · Kalibrierung und relative Orientierung des Kamerasystems
- · Bestimmung der geometrischen Parameter der Trennflächen
- · Schaffung eines Bezugssystems zur Zusammenführung von Modell und Kamera
- Raytracing
- · Objektkoordinatenberechnung

In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Schritte näher erläutert und die erzielten Ergebnisse vorgestellt.

# 2 Vorvermessung

Der aktuell entwickelte Algorithmus sieht eine sequentielle Bearbeitung zur Ermittlung der Objektkoordinaten vor. Die einzelnen Schritte sind oben bereits aufgeführt. Hierbei ist gewährleistet, dass die einzelnen Komponenten für sich mit optimaler Genauigkeit bestimmt werden können. Ein Nachteil dieser sequentiellen Methode ist eine ungünstigere Fehlerfortpflanzung gegenüber einer Bündelausgleichung.

#### 2.1 Kamerasystem

An das Design der Kamerakonfiguration sind im vorliegenden Fall erhöhe Bedingungen gestellt. Auf der einen Seite muss durch eine konvergente Anordnung ein bestmöglicher Strahlenschnitt gewährleistet werden, während auf der anderen Seite die Sichtbedingungen zu berücksichtigen sind. Besonders problematisch stellt sich bei dem verwendeten Körper die Totalreflexion dar. Eine mögliche Konfiguration zweier Kameras ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Erweiterung um zwei weiter Kameras gestaltet sich in gleicher Art und Weise, jedoch wird die benachbarte, senkrecht stehende Außenfläche, als erstes Interface genutzt. Somit ergibt sich zwischen den beiden Kamerateilsystemen ein Schnittwinkel von annähernd 90°.

Die Kameras sind fest auf einem Träger montiert, der von dem eigentlichen Messobjekt gelöst werden kann. Damit ergibt sich die Möglichkeit, das Kamerasystem unabhängig von dem Modell zu kalibrieren und Parameter der relativen Orientierung zu bestimmen. Dies geschieht mittels einer kommerziellen Software. Da die Bestimmung der Parameter losgelöst von dem Messobjekt erfolgt, werden die Koordinaten aller Objektpunkte in einem lokalen Koordinatensystem bestimmt. Die Modellierung des Lichtweges durch die verschiedenen Medien erfordert die Kenntnis der Trennflächenparameter und der Orientierungsparameter der Kameras im selben Koordinatensystem. Über die in Abbildung 2 zu sehenden Verknüpfungspunkte auf dem Messobjekt wird das lokale Koordinatensystem der Kameras in das des Messobjektes transformiert.

Für die ersten Versuche dienten zwei konvergent angeordnete Sony XC 55 (640 x 480 Pixel, 1/3") mit 6 mm Objektiven als Aufnahmesystem. Die Genauigkeit der Kalibrierung beträgt  $\sigma_0 = 0.37 \ \mu m \ bzw. 1/20 \ Pixel.$ 

### 2.2 Mehrmedienkörper

Um das Raytracing durch den Mehrmedienkörper berechnen zu können, sind die mathematische Beschreibung der Trennflächen, die Verknüpfungspunkte (siehe oben) und die Brechungsindizes aller Medien notwendig. Relevant sind hier die Parameter der zwei begrenzenden Ebenen, die

den Zugang für die beiden Kamerateilsysteme darstellen, und der Kreiszylinder. Zur Formbestimmung der Trennflächen sind verschiedene Oberflächenmesssysteme (taktil und optisch) denkbar. Da aber die Verknüpfungspunkte, welche später mittels Bildpunktmessverfahren für signalisierte Punkte bestimmt werden, ebenso zu bestimmen sind, bietet sich an dieser Stelle die Auswertung von vielen signalisierten Punkten an.

Zusätzlich zu den Markierungen der Verknüpfungspunkte wurden zahlreiche Punktmarken auf dem gesamten Messobjekt angebracht und deren Objektkoordinaten mit Hilfe von Standardsoftware bestimmt. Aus den jeweiligen Punkten wurden die ausgleichenden Flächen berechnet. Hierbei ist die Stärke des Markenmaterials zu berücksichtigen. Die gewonnenen Ergebnisse liegen alle im selben Koordinatensystem vor.

Für die aktuellen Auswertungen wurde der Brechungsindex für Plexiglas (n = 1,49) aus Tabellen entnommen.



Abbildung 2: Kamerabild auf das Interface mit den Verknüpfungspunkten

Die Formparameter der Flächenelemente konnten mit einer Genauigkeit von  $\sigma_{0, Ebene} = 10 \ \mu m$ und  $\sigma_{0, Zylinder} = 80 \ \mu m$  unter Zuhilfenahme einer digitalen SLR Kamera bestimmt werden. Die Genauigkeit der einzelnen Lagekomponenten der Verknüpfungspunkte beträgt  $\sigma_{X/Y/Z} = 2 \ \mu m$ .

# 3 Schrittweise zu den Ergebnissen

Wie in Abschnitt 1.2 dargestellt, setzen sich die Ergebnisse aus mehreren Schritten zusammen. Unter Zuhilfenahme der ermittelten Parameter der Vorvermessung kann der Bildstrahl jedes einzelnen Bildpunktes rekonstruiert werden. Die Koordinatensysteme des Kamerasystems und des Modellsystems sind dafür in ein Gemeinsames zu überführen.

Die Koordinaten der Verknüpfungspunkte wurden mit Hilfe des Vorwärtsschnittes mit einer Lage- und Tiefengenauigkeit von  $\sigma$ Lage/Tiefe = 50 / 90 µm bestimmt. Die damit berechnete Pa-

rameter der 3D Helmert-Transformation der beiden Systeme zueinander konnten mit einer Genauigkeit von  $\sigma 0 = 40 \ \mu m$  bestimmt werden.

## 3.1 Raytracing

Unter Zuhilfenahme der Parameter der inneren und äußeren Orientierung einer Kamera kann aus jedem Bildpunkt der Bildstrahl, eine Abfolge aus Strecken und einem Strahl, bestimmt werden (siehe Abbildung 3). Die Knickpunkte ergeben sich an Medienwechseln. Innerhalb eines Mediums ist der Lichtweg gerade, sofern der Brechungsindex des Materials konstant ist. Die Berechung der Einzelstrecken zwischen den Medienwechseln erfolgt nacheinander, beginnend im Projektionszentrum. Es wird je nach Anzahl der Medienwechsel folgendes Schema abgearbeitet:



Abbildung 3: Strahlenverlauf durch verschiedene Medien

Ist das Medium oder der Bereich bekannt, in dem sich die zu messenden Objekte befinden, geht für die weitere Berechnung jeder zweidimensionale Bildpunkt (x', y') in eine dreidimensionale Strecke (P1, P2) über.

Viele Parameter haben Einfluss auf die Genauigkeit des Raytracing. Neben den Parametern der Trennflächen und der Brechungsindizes hat auch die Länge des optischen Weges durch optisch dichtere Medien Auswirkungen auf die Fehlerfortpflanzung während des Raytracing.

### 3.2 Objektkoordinatenberechnung

Ein Bildpunkt ist durch verschiedene Strecken in den jeweiligen Medien charakterisiert. Um aus Bildpunkten ein Objektpunkt zu berechnen, muss die Mehrbildzuordnung im Medium des Objektpunktes gelöst sein. Kernlinien in komplexen Mehrmedienkörpern stellen gekrümmte Linien dar, die sich durch Polygonzüge mit einer Vielzahl von Stützpunkten (MAAS, 1992) approximieren lassen. Da die mathematische Abbildung von Objektpunkten in den Bildraum nicht direkt möglich ist, würde dieser übliche Ansatz der Nutzung von Kernlinien/Polygonzügen im Bild sehr rechenaufwendig werden. Betrachtet man jedoch den Kernlinienansatz im dreidimensiona-

len Raum, so ist die Projektion vom Objekt- in den Bildraum nicht notwendig. Jeder Bildpunkt (2D) geht in eine Strecke (3D) über. Der Abstand Punkt-Gerade<sup>2</sup> (2D) geht über zum kürzesten Abstand zweier Geraden<sup>3</sup> (3D). Der Kernlinienabstand im Bildraum ist äquivalent zu dem Abstand zweier Strecken (siehe Abbildung 4).



Abbildung 4: Vergleich Kernlinienabstand und Abstand von Raumstrecken

Die Berechnung der Objektkoordinaten basiert nicht wie im Einmediumfall auf den Bildkoordinaten, sondern auf den Raumstrecken. Dabei ergibt sich der Objektpunkt durch Minimierung der Abstände d zu den einzelnen Strecken nach:

$$\sum_{Bilder} dd \to \min$$
 (1)

wobei

$$d = \overline{Pg} = \min\{\overline{XP} \ f \ddot{u}r \ alle \ X \in g\}$$
(2)

Auch im Einmediumfall können Näherungen über die Minimierung der Abstände der Raumstrecken durchgeführt werden. Bei der Verwendung zweier Kameras reduziert sich die Bestimmung auf die Berechnung des Mittelpunktes der Strecke des kürzesten Abstandes. Für den Fall einer symmetrischen Anordnung der Kameras oder der Einführung von entfernungsabhängigen Gewichten, ist mit der Methode mittels kürzesten Abstands das gleiche Ergebnis zu erzielen wie durch die Minimierung der Verbesserungen der Bildpunktkoordinaten.

Die mit der oben beschriebenen Konfiguration ausgewerteten Testpunkte (vgl. Abbildung 2) konnten mit einer mittleren Genauigkeit von  $\sigma_{XYZ} = 66 \ \mu m$  bestimmt werden. Die berechneten Ergebnisse entsprechen nicht den Erwartungen.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> entspricht dem Abstand des Bildpunktes von einer Kernlinie

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> entspricht dem Abstand der Bildstrahlen

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Es wird eine grundlegende Möglichkeit gezeigt, innerhalb komplexer Mehrmedienkörper Objektkoordinaten zu berechnen. Im ersten Schritt wird die Form und Lage der Trennflächen vor der eigentlichen Berechnung der Koordinaten bestimmt. Mit Hilfe des anschließenden Raytracing kann das Problem auf den Schnitt bzw. kürzesten Abstand zweier Geraden im Raum zurückgeführt werden. Die Mehrbildzuordnung der Bildpunkte geschieht zur Verringerung der Rechenzeit im Objektraum.

Erste Versuche zeigten, dass die Methode funktioniert und einsatzbereit ist. Schaut man sich die verschiedenen Ergebnisse an, so ist deutlich ein Defizit zu erkennen. Trotz guter Kalibrierung des Kamerasystems sind die bestimmten Objektkoordinaten der Verknüpfungspunkte (ohne Mehrmediendurchgang) mit  $\sigma_{XY/Z} = 50 / 90 \ \mu m$  schlechter als zu erwarten wäre. Die Berechnung der Testpunkte (mit Mehrmediendurchgang) mit einer Genauigkeit von  $\sigma_{XYZ} = 66 \ \mu m$  ist somit nicht weiter verwunderlich. Für die Qualität der Ergebnisse sind zwei grundlegende Probleme, die beide Auswirkung auf die Bildpunktmessung haben: Die Aufnahmen wurden mit zwei VGA Kameras durchgeführt. Durch die geringe Auflösung konnten die Verknüpfungspunkte nicht ideal abgebildet werden. Das Messmodell ist für ein höher auflösendes Messsystem entwickelt worden, welches bis zum Zeitpunkt der Einreichung des Papers leider nicht zur Verfügung stand. Ein zweiter Grund für die nicht optimale Bildpunktmessung ist die Verwendung des Schwerpunktoperators. Die Beleuchtungsverhältnisse während der Aufnahme führten zu einem Versatz des Beleuchtungsmaximums jeder Marke. Für die weiteren Auswertungen steht ein Ellipsenoperator zur Verfügung.

Bei den zukünftigen Arbeiten steht die Verbesserung der Genauigkeit im Vordergrund. Wie erwähnt, kann durch ein neues Kamerasystem (4 Kameras) und einen verbesserten Punktmessoperator in erster Linie die Punktmessgenauigkeit um den Faktor 5 gesteigert werden.

## 5 Literaturverzeichnis

- BUDWIG, R., 1994: Refractive index matching methods for liquid flow investigations. Experiments in Fluids. Vol 17 (5), pp. 350-355, Sept. 1994.
- HENTSCHEL, K., 2001: Das Brechungsgesetz in der Fassung von Snellius Rekonstruktion seines Entdeckungspfades und eine Übersetzung seines lateinischen Manuskriptes sowie ergänzender Dokumente. Arch. Hist. Exact Sci. 55, pp. 297–344, Springer-Verlag.
- KOTOWSKI, R., 1987: Zur Berücksichtigung lichtbrechender Flächen im Strahlenbündel. Schriften der DGK, Reihe C, Heft 330.
- MAAS, H.-G., 1992: Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmeßtechnik. ETH Zurich - Dissertation Nr. 9665.
- MAAS, H.-G., 1995: New developments in multimedia Photogrammetry. Optical 3-D Measurement Techniques III (Eds.: A. Grün, H. Kahmen), Wichmann Verlag, Karlsruhe.
- MAAS H. G., GRUEN A. & PAPANTONIOU, D., 1993: Particle tracking velocimetry in three-dimensional flows. Experiments in Fluids. Vol. 15 (2), pp. 133-146, July 1993
- OKAMOTO, A., 1982: Wave influences in two-media Photogrammetry. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 48, pp. 1487-1499, Sept. 1982.

# Image-based detailed 3D geometric reconstruction of heritage objects

### FABIO REMONDINO<sup>1</sup>

Abstract: The attention in digital documentation and preservation of heritages is always increasing and fast but reliable, low cost, portable and practical solutions are more and more of great interest for archaeologists, restorators and the all heritage community. The goal of this work is to present the developed multi-photo image-based techniques able capture the fine 3D geometric details of such objects or sites. The size of the interesting area a large number of 3D points at high speed, they can be impractical and slow to set up and move around in archaeological sites. With our approach we provide for geometric details in an automatic and reliable manner to achieve photo-realistic visualisation for heritage and archaeological applications. Our main contributions are the use of multiple image features (grid point, interest points and edges) and the simultaneous processing of multiple images. The reported results demonstrated the utility and flexibility of the technique and proved that it creates highly detailed models in a reliable manner with no unpredictable behaviour for many different types of surface detail. Accuracy tests with range data are also reported.

## 1 Introduction

3D modeling of an object can be seen as the complete process that starts from the data acquisition and ends with a virtual model in three dimensions visible interactively on a computer. Nowadays the generation of computer 3D models is mainly achieved with range sensors (e.g. laser scanner) or image data while in some cases other information like CAD, surveying or GPS data are also integrated in the project [EL-HAKIM et al., 2007]. Different applications and fields require 3D models, from the traditional industrial inspections and robotics to the recent interests for visualization, documentation and preservation of Cultural Heritage.

Among the available optical measurement techniques (mainly passive and active methods), photogrammetry is a passive image-based documentation method able to provide precise 3D geometric and textural information of an imaged object. In the last decade, with the advent of automated procedures (mainly for satellite and aerial cases) and fully digital sources and products, it has become easier to use and cheaper and a wide range of commercial software is available. Most of the current reliable and precise image-based solutions rely on semi-automated measurements; therefore the introduction of automated algorithms is a key goal in the photogrammetric communities. Generally we can classify 3D modeling methods according to the level of automation or the required input data while their strength is reflected by (i) the variety of scene that can be processed, (ii) the level of detail that can be reconstructed and (iii) the accuracy of the final model. According to the project requirements, automated, semi-automated or manual image-based approaches should be selected to produce digital models usable for inspections,

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Institute of Geodesy and Photogrammetry – ETH Zurich, Switzerland E-mail: <u>fabio@geod.baug.ethz.ch</u>; Web: <u>http://www.photogrammetry.ethz.ch</u>

visualization or documentation. Automated methods focus mainly on the full automation of the process but generally produce results which are mainly good for nice-looking real-time 3D recording or simple visualization. On the other hand, semi-automated methods try to reach a balance between accuracy and automation and are very useful for precise documentation and restoration planning. Therefore it is always very important to define the project requirements and afterwards select the more suited recording and processing method.

Even if active sensors are promising and being very often used in 3D modeling projects, their cost, size, power requirement, the required large number of scans to overcome occlusions and the intricate handling of their data are significant drawbacks. Alternatively, image-based techniques provide data from low cost portable digital cameras or even mobile phones and the recent developments in image matching and surface measurement are really promising.

In this article we present our latest research in terrestrial image-based modeling for heritage and archaeological objects documentation, focusing mainly on the image matching algorithm developed to derive dense and detailed surface models from a generic set of convergent terrestrial images.

# 2 Terrestrial image-based modeling

Compared to other recording and modeling methods, images can be acquired with no expensive systems and contain all the information for the generation of a textured 3D model. But deriving a complete, detailed, accurate and realistic 3D image-based model is still a difficult task, in particular for large or detailed objects, if the images are acquired by non-experts and if uncalibrated or widely separated images are used. Since many years photogrammetry is dealing with the precise 3D reconstruction of objects from images. Even if it often considered as time consuming and complicated, the heritage community is starting to consider it for digital documentation also at terrestrial scale as a very promising alternative to range sensors, traditionally used as easy and efficient instruments, even if not always portable and usable. Photogrammetry requires precise calibration and orientation procedures, but different commercial packages are nowadays available. In the terrestrial case, those packages are all based on manual or semi-automated measurements. They allow, after the (manual) tie point measurement and bundle adjustment phase, to obtain sensor calibration and orientation data, 3D object point coordinates from a multi-image network, as well as wireframe or textured 3D models. Nevertheless two great research topics are still largely investigated: the automated image orientation and surface measurement. Indeed, at the moment, no commercial solution is able to perform an automated markerless image orientation [REMONDINO & RESSL, 2006] while automated camera calibration based on coded-target is an issue already solved since some years [GANGI & HANLEY, 1998; CRONK et al., 2006]. Furthermore, there is no package able to automatically reconstruct a complex surface model employing more than two images: indeed commercial photogrammetric software (e.g. LPS - Leica Geosystem, PI-3000 - Topcon) have only a matching tool able to provide dense surface model from 'convergent' stereo-pairs [KADOBAYASHI et al., 2004; CHANDLER et al., 2007] while a multi-photo approach would be more reliable and efficient. Fully automated 3D modeling procedures have been widely reported in the vision research community [FITZIBBON & ZISSERMAN, 1998; NISTER 2001; POLLEFEYS et al., 2004]. These approaches start with a sequence of closely separated images taken with an uncalibrated camera. The system then extract interest points, sequentially match them across the views and compute the camera parameters as well as the 3D coordinates of the matched points. This is done in a projective geometry framework and is usually followed by a bundle adjustment. A self-calibration, to compute the interior camera parameters, is afterwards performed in order to obtain a metric reconstruction, up to a scale, from the projective one. The 3D surface model is then automatically generated by means of dense stereo depth maps. It is therefore clear that the key to the success of these fully automated approaches is the very short interval between consecutive images, the absence of illumination or scale changes and the good texture in the images. These are all constraints that cannot always be satisfied during the image acquisition [VOLTOLINI et al., 2006], in particular the small baseline. Moreover illumination changes can always appear in a sequence as well as image-scale differences. To face the wide baseline and the image-scale problems, different strategies have been proposed [MATAS et al., 2002; LOWE, 2004; MIKOLAJCZYK et al., 2005], although further research in this area is still needed. Indeed their reliability and applicability for automated image-based modeling of complex objects is still not satisfactory, as they yield mainly a sparse set of matched feature points. Automated dense reconstruction were instead presented in [STRECHA et al., 2003; MEGYESI & CHETVERIKOV, 2004], but no accuracy tests were reported.

In some applications, manual measurements are also performed, generally for complex architectural objects or in cultural heritage documentations where highly precise and detailed results are required [GRUEN et al., 2004]. Manual measurements are time consuming and provide for less dense 3D point clouds, but have higher reliability compared to automated procedures. Therefore, the modeling steps are generally separated, having automation where possible and interaction where reliability and precision are necessary.

The entire photogrammetric workflow used to derive metric and reliable information of a scene from a set of images consists of (i) calibration and orientation, (ii) 3D measurements via image matching, (iii) structuring and modeling, (iv) texture mapping and visualization.

In the following section, the surface measurement approach developed at ETH to derive dense and detailed 3D model from terrestrial images is presented. For a review of the entire image-based modeling pipeline we refer to [REMONDINO & EL-HAKIM, 2006].

## 3 Dense and detailed surface measurement

### 3.1 Image matching overview

Image matching can be defined as the establishment of correspondences between primitives extracted from two or more images. Typical primitives are points or edges. In its oldest form, image matching involved 4 transformation parameters (cross-correlation) and could already provide for successful results [FOERSTNER, 1982]. Further extensions considered a 6- and 8-parameters transformation, leading to the well known non-linear Least Squares Matching (LSM) estimation procedure [GRUEN, 1985; FOERSTNER, 1986]. GRUEN [1985] and GRUEN & BALTSAVIAS [1986] introduced the Multi-Photo Geometrical Constraints (MPGC) concept into the image matching procedure and integrated also the surface reconstruction into the process.

Then from image space, the matching procedure was generalized to object space, introducing the concept of 'groundel' or 'surfel' [WROBEL, 1987; HELAVA, 1988].

In the vision community, two-frame stereo-correspondence algorithms are predominantly used [DHOND & AGGARWAL, 1989; BROWN, 1992; SCHARSTEIN & SZELISKI, 2002], producing a dense disparity map consisting of a parallax estimate at each pixel. Often the second image is resampled in accordance with the epipolar line to have a parallax value in only one direction. A large number of algorithms have been developed and the dense output is generally used for view synthesis, image-based rendering or quick modeling of complete regions.

A part from simple points, the extraction of feature lines [DHOND & AGGARWAL, 1989; ZIOU & TABBONE, 1998] is also a crucial step in the surface generation procedure. Lines (edgel) provide more geometric information than single points and are also useful in the surface reconstruction (e.g. as breaklines) to avoid smoothing effects on the object edges. Edge matching [VOSSELMAN, 1992; GRUEN & LI, 1996; SCHMID & ZISSERMAN, 2000] establishes edge correspondences over images acquired at different standpoints. Similarity measures from the edges attributes (like length, orientation and absolute gradient magnitude) are a key point for the matching procedure. Unfortunately in close-range photogrammetry, the viewpoints might change consistently; therefore similarity measures are not always useful for edge matching.

Even if more than three decades have been devoted to the image matching problem, nowadays some important limiting factors still remain. A fully automated, precise and reliable image matching method, adaptable to different image sets and scene contents is not available, in particular for close-range images. The limits stay in the insufficient understanding and modeling of the undergoing processes (human stereo vision) and the lack of appropriate theoretical measures for self-tuning and quality control. The design of an image matcher should take into account the topology of the object, the primitives used in the process, the constraint used to restrict the search space, a strategy to control the matching results and finally optimization procedures to combine the image processing with the used constraints.

#### 3.2 Surface measurement from multiple images

The multi-image matching approach reported in this paper was originally developed for the processing of the very high-resolution TLS Linear Array images [GRUEN & ZHANG, 2003] and afterwards modified to accommodate any linear array sensor [ZHANG & GRUEN, 2004; ZHANG, 2005]. Then it has been extended to process other image data such as the traditional aerial photos or convergent close-range images [REMONDINO & ZHANG, 2006; LAMBERS et al., 2007]. It is based on the Multi-Photo Geometrically Constrained (*MPGC*) matching concept [GRUEN & BALTSAVIAS, 1986] and the Least Squares B-Spline Snakes (*LSB-Snakes*) method [GRUEN & LI, 1996]. The matcher combines different matching algorithms according to the following steps:

1. *Image pre-processing*: The set of available images is processed combining an adaptive smoothing filter and the Wallis filter [WALLIS, 1976], in order to reduce the effects of the radiometric problems such as strong bright and dark regions and optimizes the images for subsequent feature extraction and image matching. Furthermore image pyramids are generated.

2. *Multiple Primitive Multi-Image* (MPM) *matching*: This part is the core of the all strategy for accurate and robust surface reconstruction. Starting from the low-density features in the lowest resolution level of the image pyramid, the approach incorporates multiple image primitives

(feature points, grid points and edges) extracted and matched in 3 integrated subsystems: the feature point extraction and matching, the edge extraction and matching (based on edge geometric and photometric attributes) and the relaxation-based relational matching procedure. Within the pyramid levels, the matching is performed with an extension of the standard cross-correlation technique (Geometrically Constrained Cross-Correlation), integrating the epipolar geometry constraint for restricting the search space. The matcher exploits the concept of multi-image matching guided from object space and allows reconstruction of 3D objects by matching all available images simultaneously, without having to match all individual stereo-pairs and merge the results [GRUEN & BALTSAVIAS, 1986]. Moreover, at each pyramid level, a TIN is produced using the matched features and it is used in the subsequent pyramid level to get an approximation of the analyzed surface.

3. *Refined matching*: The MPGC matching and LSB-Snakes methods are used to refine the previous correlation results, achieve potentially sub-pixel accuracy matches and identify some inaccurate and possibly false matches. This is applied only at the original image resolution level. The surface derived from the previous step provides well enough approximations for the two matching methods and increases the convergence rate.

The main characteristics of the multi-image-based matching procedure are:

• Truly multiple image matching: the approach does not aim at pure image-to-image matching but it directly seeks for image-to-object correspondences. A point is matched simultaneously in all the images where it is visible and, exploiting the collinearity constraint, the 3D coordinates are directly computed, together with their accuracy values.

• Matching with multiple primitives: the method is developed to be a robust hybrid image matching algorithms which takes advantage of both area-based matching and feature-based matching techniques and uses both local and global image information. In particular, it combines an edge matching method with a point matching method through a probability relaxation based relational matching process. Feature points are suitable to generate dense and accurate surface models but they suffer from problems caused by image noise, occlusions and discontinuities. Edges generate coarser but more stable models as they have higher semantic information and they are more tolerant to image noise.

• High matching redundancy: exploiting the multi-image concept, highly redundant matching results are obtained. The high redundancy also allows automatic blunder detection. Mismatches can be detected and deleted through the analysis and consistency checking within a small neighbourhood.

A part from the known camera parameters, the matcher requires some seed points between the images to start the automated matching procedure. These points can be measured manually in mono or stereo-view as well as imported from the orientation phase.

# 4 Examples

We have performed many tests on different close-range data sets, trying to evaluate the presented surface measurement approach under different image conditions: widely separated images, untextured surfaces, detailed heritage objects, illumination or scale changes, etc. Results are presented in Figure 1, Figure 2 and Figure 3.



Figure 1: Heritage objects and derived 3D results: detailed and complex ornament (left) and ancient ruins of a church (right).



Figure 2: Three wide baseline images and the derived 3D model, display as colour-shaded as well as textured model.

For accuracy tests, we compared the image matching results with different ground truth data, acquired in the lab [EL-HAKIM et al., 2007] and also in the field [RIZZI et al., 2007]. The ground truth data were acquired with triangulation-based or ToF laser scanners. To compare the photogrammetric models with the ground truth data, we used commercial reverse engineering software. The registration and '3D-compare' functions are able to compare two surface models

and provide a colour-coded map of the distances between the models. A sample results is reported in Figure 4. In all our experiments, the average difference between the scanned model and the image-based model was between 1 mm (triangulation-based scanner) and 3 mm (ToF scanner and object ca 20 m far away from the sensors), leading to the conclusion that the reached accuracy and details of both approaches are very similar.



Figure 3: Sample models of detailed heritages: small pot, church frontal relief, frescoed arches, small wooden relief.

# 5 Conclusions

3D image-based modeling of heritages is a very interesting topic with a lot of possible applications. We believe that site managers, archaeologists, restorators, conservators and the whole heritage community need simple and cost-effective methods to record and document heritages. Image-based modeling is a great approach and the presented results show that advanced surface measurement algorithms can get similar results to range sensors, but in a cheaper, fastest, portable and simpler way. In this contribution we reported our developed matching and surface measurement strategy. It is a multi-image approach, more reliable and precise than typical stereo-pair algorithms and based on the least squares matching principle. Further accuracy tests are required but we can definitely say that the aspect that is no more decisive in the choice of the 3D modeling technique is the accuracy and detail of the final 3D model, at least in most of the terrestrial applications.



Figure 4: 3D model of a relief realized using 5 images acquired with a 13.5Mpixel camera equipped with a 135 mm objective. The accuracy analysis (colour-coded map) with range sensor data (Leica HDS 3000, 6 mm positional accuracy at 50m) gave a standard deviation of ca 3 mm.

## 6 References

- BROWN, L.G., 1992. A survey of image registration techniques. ACM Computing surveys, 24(4): 325-376
- CHANDLER, J., BRYAN, P. & FRYER, J., 2007: The development and application of a simple methodology for recording rock art using consumer-grade digital cameras. *Photogrammetric Record*, 22(117), pp. 10-21
- CRONK, S., FRASER, C. & HANLEY, H., 2006: Automatic metric calibration of colour digital cameras. *Photogrammetric Record*, 21(116), pp. 355-372
- DHOND, U.R. & AGGARWAL, J.K., 1989: Structure from Stereo. *IEEE Transaction on System, Man and Cybernetics*, Vol. 19(6), pp. 1489-1510
- EL-HAKIM, S., GONZO, L., VOLTOLINI, F., GIRARDI, S., RIZZI, A., REMONDINO, F. & WHITING, E., 2007: Detailed 3D modeling of castles. *Int. Journal of Architectural Computing* (in press)
- FITZGIBBON, A. & ZISSERMAN, A., 1998: Automatic 3D model acquisition and generation of new images from video sequence. Proceedings of *European Signal Processing Conference*, pp. 1261-1269
- FOERSTNER, W., 1982: On the geometric precision of digital correlation. *IAPRS*, Vol. 24(3), pp.176-189
- FOERSTNER, W., 1986: A feature based correspondence algorithm for image matching. *IAP*, Vol. 26(3), Rovaniemi
- GANCI, G. & HANLEY, H., 1998: Automation in videogrammetry. IAPRS, 32(5), pp.53-58

- GEORGESCU, B. & MEER, P., 2004: Point Matching under Large Image Deformations and Illumination Changes. PAMI, Vol. 26(6), pp. 674-688
- GRUEN, A., 1985: Adaptive least square correlation: a powerful image matching technique. *South African Journal of PRS and Cartography*, Vol. 14(3), pp. 175-187
- GRUEN, A. & BALTSAVIAS, E., 1986: Adaptive least squares correlations with geometrical constraints. Proc. of SPIE, Vol. 595, pp. 72-82
- GRUEN, A. & LI, H., 1996: Linear feature extraction with LSB-Snakes from multiple images. IAPRS, Vol. 31(B3), pp. 266-272
- GRUEN, A. & ZHANG L., 2003. Automatic DTM Generation from TLS data. In: Gruen/Kahman (Eds.), Optical 3D Measurement Techniques VI, Vol. I, ISBN: 3-906467-43-0, pp. 93-105
- GRUEN, A., REMONDINO, F. & ZHANG, L., 2004: Photogrammetric Reconstruction of the Great Buddha of Bamiyan, Afghanistan. *Photogrammetric Record*, Vol. 19(107)
- HELAVA, U.V., 1988: Object-space least-squares correlation. PE&RS, Vol. 54(6), pp. 711-714
- KADOBAYASHI, R., KOCHI, N., OTANI, H. & FURUKAWA, R., 2004: Comparison and evaluation of laser scanning and photogrammetry and their combined use for digital recording of cultural heritage. *IAPRS&SIS*, 35(5), pp. 401-406
- LAMBERS, K., EISENBEISS, H., SAUERBIER, M., KUPFERSCHMIDT, D. GAISECKER, T., SOTOODEH, S., & HANUSCH, T., 2007: Combining photogrammetry and laser scanning for the recording and modelling of the Late Intermediate Period site of Pinchango Alto, Palpa, Peru. Journal of Archaeological Science, 34 (in press)
- LOWE, D., 2004: Distinctive image features from scale-invariant keypoints. International Journal of Computer Vision, Vol. 60(2), pp. 91-110
- MATAS, J., CHUM, O., URBAN, M. & PAJDLA, T., 2002: Robust wide baseline stereo from maximally stable extremal regions. Proceedings of *BMVC*, pp. 384-393
- MIKOLAJCZYK, K. TUYTELAARS, T., SCHMID, C., ZISSERMAN, A., MATAS, J., SCHAFFALITZKY, F., KADIR, T. & VAN GOOL, L. 2005: A comparison of affine region detectors. *Int. Journal of Computer Vision*
- MEGYESI, Z. & CHETVERIKOV, D., 2004: Affine propagation for surface reconstruction in wide baseline stereo. Proc. *ICPR*, Cambridge, UK
- NISTER, D., 2001: Automatic dense reconstruction from uncalibrated video sequences. PhD Thesis, Computational Vision and Active Perception Lab, NADA-KHT, Stockholm, 226 p.
- POLLEFEYS, M., VAN GOOL, L., VERGAUWEN, M., VERBIEST, F., CORNELIS, K. & TOPS, J., KOCH, R., 2004: Visual modeling with a hand-held camera. *IJCV*, Vol. 59(3), pp. 207-232
- REMONDINO, F. & EL-HAKIM, S., 2006: Image-based 3D modelling: a review. *Photogrammetric Record*, 21(115), pp. 269-291
- REMONDINO, F. & RESSL, C., 2006: Overview and experience in automated markerless image orientation. *IAPRS&SIS*, Vol. 36(3), pp. 248-254
- REMONDINO, F. & ZHANG, L., 2006: Surface reconstruction algorithms for detailed closerange object modeling. *IAPRS&SIS*, Vol. 36(3), pp. 117-123
- RIZZI, A., VOLTOLINI F., REMONDINO, F., GIRARDI, S. & GONZO, L., 2007: Optical measurement techniques for the digital preservation, documentation and analysis of cultural heritages. In: Gruen/Kahman (Eds.), *Optical 3D Measurement Techniques* VIII, Zurich, Switzerland (in press)

- SCHARSTEIN, D. & SZELISKI, R., 2002: A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. *IJCV*, 47(1/2/3): 7-42
- SCHMID, C. & ZISSERMAN, A., 2000: The geometry and matching of lines and curves over multiple views. *IJCV*, Vol. 40(3), pp. 199-233
- STRECHA, C., TUYTELAARS, T. & VAN GOOL, L., 2003: Dense Matching of Multiple Wide-baseline Views. IEEE Proceedings of *ICCV'03*, Vol.2, pp. 1194-1201
- TUYTELAARS, T. and VAN GOOL, L., 2004: Matching widely separated views based on affine invariant regions. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 59(1), pp. 61-85
- VOLTOLINI, F., REMONDINO, F., PONTIN, M. & GONZO, L., 2006: Experiences and considerations in image-based-modeling of complex architectures. *IAPRS&SIS*, Vol. 36(5), pp. 309-314
- VOSSELMAN, G., 1992: Relational matching. Lecture Notes in Computer Science, No. 628, Springer Berlin, 190 pages
- WALLIS, R., 1976: An approach to the space variant restoration and enhancement of images. Proc. of Symposium on Current Mathematical Problems in Image Science, Naval Postgraduate School, Monterey, CA
- WROBEL, B., 1987: Facet Stereo Vison (FAST Vision) A new approach to computer stereo vision and to digital photogrammetry. Proc. of ISPRS Intercommission Conference on 'Fast Processing of Photogrammetric Data', Interlaken, Switzerland, pp. 231-258
- ZHANG, L. & GRUEN, A., 2004: Automatic DSM Generation from Linear Array Imagery Data. *IAPRS&SIS*, Vol. 35(B3), pp. 128-133
- ZHANG, L., 2005: Automatic Digital Surface Model (DSM) generation from linear array images. PhD Thesis Nr. 16078, IGP, ETH Zurich, Switzerland, 199 pages
- ZIOU, D. & TABBONE, S., 1998: Edge Detection Techniques An Overview. Journal of Pattern Recognition and Image Analysis. Vol. 8, pp. 537-559

# Instrumentenuntersuchung des Laserscanners LMS Z420i von RIEGL

#### ANTJE GRÜNKEMEIER & RUDOLF STAIGER<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Terrestrisches Laserscanning ist ein relativ junges Messverfahren, das nicht nur bisherige Messaufgaben ersetzt, sondern auch aufgrund der schnellen und reflektorlosen Erfassungstechnik völlig neue Aufgabengebiete erschließt. Qualitativ hochwertige Endergebnisse, wie geometrische Modelle, Schnitte, Volumina, Flächen, Abstände, sind nur erzielbar, wenn auch die Qualität der Rohdaten entsprechend hoch ist. Aus diesem Grund sind instrumentelle Untersuchungen zur Qualität der erfassten Koordinaten eines jeden Scanners von fundamentaler Bedeutung.

Die instrumentellen Eigenschaften des terrestrischen Laserscanners LMS Z420i der Firma RIEGL (Österreich) sind näher untersucht worden.

Folgende Untersuchungen sind dabei durchgeführt worden:

- die Genauigkeit der Komponenten Winkel- und Streckenmessung
- der Einfluss des Objektes (Farbe, Material)
- die Genauigkeit der Koordinaten und die Rekonstruktion geometrischer Elemente

## 1 Einleitung

Das terrestrische Laserscanning ist ein recht junges Messverfahren und hat sich bereits als eine weitere geodätische Messtechnik neben den konventionellen Verfahren wie Tachymetrie, Photogrammetrie und Satellitengeodäsie etabliert. Die anfängliche Vermutung, dass diese neue Messtechnik die anderen komplett verdrängt, hat sich bisher nicht bewahrheitet.

Die Rohdaten (x, y, z, i) sind Ausgangspunkt jeder Weiterverarbeitung. Die geometrische Qualität der abgeleiteten Produkte kann nur hochwertig sein, wenn auch die Rohdaten befriedigende Eigenschaften aufweisen. Deshalb sind instrumentelle Untersuchungen mit dem Ziel eine Aussage über die Qualität der Rohdaten treffen zu können wichtig und sinnvoll. Hierzu werden typische Messaufgaben und Messbedingungen nachgestellt und mit genaueren Methoden verglichen.

## 2 Mess-System RIEGL LMS Z420i

Das hybride Mess-System besteht aus dem Laserscanner RIEGL LMS Z420i und einer kalibrierten, fest auf dem Scannerkopf montierten Digitalkamera. So erhält man sowohl 3D-Daten des Laserscanners als auch zweidimensionale Bilder der Kamera. Ein erstes wichtiges Zwischenprodukt ist die kolorierte Punktwolke: jedem Scanpunkt (x, y, z) werden Farbwerte (z. B. RGB) zugeordnet.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Antje Grünkemeier & Rudolf Staiger, Fachhochschule Bochum, Fachbereich Vermessungswesen und Geoinformatik, e-mail: rudolf.staiger@fh-bochum.de

#### 2.1 Aufbau und Funktionsweise

Der terrestrische Laserscanner RIEGL LMS Z420i besteht aus einem Unterbau und einem drehbaren, oberen Teil. Durch den drehbaren Oberbau können in der Horizontalrichtung 360° erfasst werden. Das vertikale Gesichtsfeld ist bei diesem Hybrid-Scanner auf 80° begrenzt. Durch manuelle Neigung (Tilt) des gesamten Scanners innerhalb einer Kippvorrichtung kann auch der vertikale Bereich mit Hilfe unterschiedlicher Neigungswinkel (im Bereich  $\pm 90^{\circ}$  in 5°-Schritten) vergrößert werden (Abb. 1).



Abb. 1: Neigen des Scanners innerhalb der Kippvorrichtung

#### 2.2 Technische Angaben des Herstellers

Streckenmessverfahren	Impulslaufzeit
Reichweite	bis zu 1000 m (bei Reflektivität von 0,8)
	bis zu 350 m (bei Reflektivität von 0,1)
Minimale Entfernung	2 m
Entfernungsmessgenauigkeit	10 mm (auf 50 m)
Messgeschwindigkeit	bis zu 12.000 Punkte / Sekunde
Wiederholbarkeit der Streckenmessung	8 mm für eine Einzelmessung
_	4 mm für einen Feinscan (Targetscan)
Eigenschaften des Laserstrahls	Laserklasse 1
	Wellenlänge im nahen Infrarot
	Strahldivergenz 0,25mrad,
	das entspricht 25 mm auf 100 m
Scanbereich	360° horizontal
	80° vertikal
Minimale Winkelschrittweite	0,004° horizontal und vertikal
Interne Winkelauflösung	0,0025° horizontal
	0.002° vertikal

Tab. 1: Technische Angaben des Herstellers (weitere Angaben unter www.riegl.com)

### 2.3 Kolorierung der Punktwolke

Durch die Kombination aus Laserscanner und Digitalkamera ist eine Kolorierung der Punktwolke möglich. Dafür werden direkt im Anschluss an den Scanvorgang Fotos gemacht, die dann auf die Punktwolke gemappt werden können. Zu jedem Foto wird dafür die Horizontalrichtung abgespeichert, die notwendig ist, um die Verknüpfung vom Kamerasystem zum Scanner-Koordinatensystem herzustellen. Das Beispiel zeigt eine Aufnahme der Stiepeler Dorfkirche. Die Kameraeigenschaften sind nicht weiter untersucht worden.



Punktwolke (Grauwertdarstellung)









### 2.4 Software RiSCAN PRO

Die Software RiSCAN PRO ist ein Produkt der Firma RIEGL und wird gemeinsam mit den terrestrischen Laserscannern vertrieben. Mit diesem Programm wird der Laserscanner gesteuert und die Scanner-Daten erfasst. Außerdem dient RiSCAN PRO auch zur Visualisierung, Speicherung, Verwaltung und Weiterverarbeitung der Daten sowie der Erzeugung von Folgeprodukten, wie z.B. Orthophotos.

RiSCAN PRO unterscheidet zwischen vier verschiedenen Koordinatensystemen. Die ermittelte Punktwolke liegt zunächst in einem lokalen Koordinatensystem vor, dem so genannten SOCS –

<u>S</u>canner's <u>O</u>wn <u>C</u>oordinate <u>S</u>ystem – in Abbildung 3 grün dargestellt. Die Fotos der Kamera sind im kameraeigenen System (CMCS – <u>Camera C</u>oordinate <u>S</u>ystem), hier rot dargestellt. Die



System (CMCS – <u>Camera Coordinate System</u>), mer rot dargestent. Die Transformationsmatrix zwischen den beiden Systemen ist die so genannte Camera Mounting. Diese Matrix stellt die präzise räumliche Beziehung zwischen SOCS und CMCS her.

Das PRCS (<u>Project Coordinate System</u>) ist das Projektkoordinatensystem, das vom Benutzer festgelegt werden kann. Hierbei handelt es sich entweder um ein örtliches oder ein übergeordnetes System. Die Anzahl der Ziffern der Koordinaten ist dabei allerdings auf sieben signifikante Stellen begrenzt (,single precision'). Bei dem GLCS (<u>Gl</u>obal <u>Coordinate System</u>) handelt es sich um ein globales Koordinatensystem, in welches das projektbezogene Koordinatensystem transformiert werden kann.

Abb. 3: Kamera- und Scannerkoordinatensystem

# 3 Überprüfung des RIEGL LMS Z420i

#### 3.1 Genauigkeit der Streckenmessung

Die Streckenmessung beim RIEGL LMS Z420i erfolgt über das Impulslaufzeitverfahren. Dadurch sind große Reichweiten (bis zu 1000 m) möglich. Der Nachteil dieser Streckenmessmethode gegenüber dem Phasenvergleichsverfahren liegt in der deutlich geringeren Messrate. Die effektive Messgeschwindigkeit liegt bei etwa 10.000 Punkten pro Sekunde.

Um eine Aussage über die Genauigkeit der Streckenmessung des RIEGL LMS Z420i treffen zu können, wurde ein Vergleich mit Sollstrecken auf der Prüfstrecke der Fachhochschule Bochum durchgeführt. Dafür wurde eine Zieltafel in unterschiedlichen Entfernungen gescannt, eine ausgleichende Ebene berechnet und daraus eine Strecke abgeleitet.



Abb. 4: Streckendifferenzen Soll - Ist

Bei der Auswertung ergeben sich Differenzen zwischen Sollstrecken und gemessenen Strecken, die innerhalb der Herstellerangabe von 10 mm liegen. Bei einer Entfernung von 200 m treten Abweichungen im Bereich von wenigen Millimetern auf, d.h. der Streckenmessteil weist hohe Genauigkeiten auf. Die Standardabweichungen (in Abb.4 als Fehlerindikator dargestellt) liegen bei etwa 10 mm.

Zur Bestimmung der Reichweite wurden Messungen zu unterschiedlichen Tageszeiten durchgeführt. Es ergab sich keine Abhängigkeit der Reichweite vom Tageslicht (tagsüber, bei Dämmerung, nachts) und die maximale Entfernung lag bei etwa 1100m. Der Entfernungsmessteil dieses Laserscanners übertrifft damit die Angaben des Herstellers.

#### 3.2 Genauigkeit der Winkelmessung



Um neben den Untersuchungen des Streckenmessteils auch eine Aussage über die Qualität der Winkelmessung treffen zu können, wurde ein Verschiebetest mit einem Kreuzschlitten (vgl. Abb. 5) durchgeführt. Eine Referenzgerade wird durch den Scannerstandpunkt und einen Passpunkt festgelegt. Orthogonal zu dieser Linie wird der Schlitten mit drei Reflexmarken (Targets) insgesamt zwölfmal um jeweils 0,5 mm horizontal verschoben. Die Sollverschiebung beträgt demnach insgesamt 6 mm. Über die bekannten Sollabstände der einzelnen Targets auf dem Schlitten lässt sich nun eine Aussage über die Genauigkeit der Winkelmessung ableiten. Die Reflexmarken werden in der Anwendung zur Verknüpfung und Georeferenzierung der Scans genutzt. Die Zentren der Marken wurden mit RiSCAN PRO bestimmt.

Abb. 5: Kreuzschlitten mit Targets



Abb. 6: Auswertung des Verschiebetests für das obere Target

Die maximalen Differenzen für die einzelnen Punkte liegen im Bereich von  $\pm 2,5$  mm. Die Winkelgenauigkeit lässt sich nun aus dem maximalen Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Messungen ableiten. Diese Entfernung liegt bei maximal 3,5 mm bei einer Strecke von 50 m. Daraus lässt sich die Winkelgenauigkeit zu 0,004° abschätzen. Damit liegt sie in der Größenordnung der minimalen Schrittweite.

#### 3.3 Koordinatenüberprüfung an Hand eines Testfeldes



Der terrestrische Laserscanner RIEGL LMS Z420i erzeugt bei jedem Scan dreidimensionale Koordinaten in einem eigenen Scannerkoordinatensystem (SOCS).

Um die Koordinatengenauigkeit überprüfen zu können, wird nun ein vertikales Testfeld mit Reflexmarken an der Fassade der FH Bochum eingerichtet. Die Sollkoordinaten werden über räumlichen Vorwärtsschnitt tachymetrisch bestimmt und liegen mit einer übergeordneten Koordinatengenauigkeit von unter 1 mm vor.

Anschließend wird das Testfeld von unterschiedlichen Standpunkten und in verschiedenen Scanpositionen gescannt, um zu überprüfen, inwieweit die ermittelten Koordinaten von der Position und der Ausrichtung des Scanners abhängen.

Abb. 7: Aufbau des Testfeldes

Die jeweiligen SOCS werden in das übergeordnete Wandsystem transformiert und die Differenzen zu den Sollkoordinaten bestimmt. Die Differenzen, die sich dann ergeben, liegen im Bereich von maximal  $\pm 6$  mm in den einzelnen Komponenten. Beim Vergleich der drei unterschiedlichen Scannerstandpunkte tauchen keine signifikanten Differenzen auf. Die Koordinatenmessung ist demnach unabhängig von der Ausrichtung und Positionierung des Scanners.

### 3.4 Einfluss des Objektes

Die Entfernungsmessung des Laserscanners beruht auf der Laufzeit des zurückkommenden Signals. Die Stärke des reflektierten Strahls hängt u.a. von der Oberflächenbeschaffenheit des Objekts, dem Einfallswinkel und der Entfernung ab. Je nach Dichte und Rauhigkeit des Materials ist das Signal unterschiedlich stark.

Um eine Abhängigkeit der Streckenmessung von der Materialart zu untersuchen, wird eine Konstruktion mit neun unterschiedlichen Materialien (verschiedene Steinformen, Fliesen, Styropor, Holz, Metall) aus zwei verschiedenen Entfernungen (etwa 5 m und 14 m) gescannt. Am Rahmen dieser Konstruktion werden vier Targets angebracht, die eine Sollebene festlegen. Der Abstand dieser Sollebene vom Standpunkt entspricht dem Sollabstand zum Scanner.

Bei der Auswertung treten Differenzen zur Sollebene von circa -5 mm auf. Nur die Entfernungsmessung zu dem Styropor-Block weicht signifikant von der Sollstrecke ab.



Abb. 8: Auswertung des Materialtests

Bei Styropor ist die Oberfläche rau und deshalb tritt der Strahl teilweise in das Material ein und wird erst in einer tieferen Schicht reflektiert. Dadurch entsteht eine systematische Verlängerung bei der Distanzmessung.

In der Software RiSCAN PRO werden neben den Koordinaten, der Winkelmessung und der Streckenmessung auch die Intensitätswerte abgelegt. Die Intensitäten werden als normierte

Werte zwischen 0 und 1 gespeichert, wobei 1 die stärkste Rückstrahlung darstellt.

Um den Einfluss der Objektfarbe auf die Streckenmessung zu prüfen, wird eine Farbtafel mit acht unterschiedlichen Farben und Alufolie gescannt (Abb. 10).

Bei Betrachtung der Scans fällt auf, dass außer der Alufolie und der Farbe schwarz keine Unterscheidung der Farben erkennbar ist. Dieses Defizit wird durch die Kombination mit der Kamera weitestgehend eliminiert.

Zur Auswertung wird eine Sollebene bestimmt und anschließend von jeder Farbe bzw. der Alufolie der Abstand zu dieser Ebene berechnet. Für schwarz und die Alufolie ergeben sich Streckendifferenzen zur Sollebene von etwa 4 mm. Die anderen Farben haben Abweichungen von unter 2 mm. In jedem Fall liegen die Abweichungen jedoch innerhalb der Standardabweichung.



Abb. 9: Farbtest



Abb. 10: Ergebnisse des Farbtests

#### 3.5 Rekonstruktion von Zylindern

Auf dem Campusgelände der Universität Duisburg - Essen steht ein Kunstwerk aus 32 quadratisch angeordneten Stahlsäulen (Abb. 11). Ein Scan dieser Säulen soll Aufschluss über die Rekonstruktionsgenauigkeit von Zylindern geben. Gescannt wurde von drei unterschiedlichen Standpunkten aus. Der erste Scannerstandpunkt lag in der Mitte der Säulen, so dass eine symmetrische Verteilung entstand. Ein weiterer Standpunkt befand sich in einer Ecke der Säulen (neben Säule Nummer 32), so dass sich unterschiedliche Entfernungen zu den Säulen ergaben. Der letzte Standpunkt lag außerhalb des Quadrates (etwa 25 m von der Säule 10 entfernt).



Abb. 11: Anordnung der Säulen; LMS Z420i mit aufgesetzter Kamera

Zunächst wurden alle Säulen modelliert. Einige Zylinder konnten aufgrund optischer Hindernisse (Bäume, Schaukästen oder andere Zylinder) nicht modelliert werden.

Der Solldurchmesser der Säulen ist mit 0,611 m bekannt. Der erste Standpunkt (Mitte) entspricht einer optimalen Aufstellung: die Differenzen in den Durchmessern (Soll – Ist) betragen max.  $\pm 2$  mm (vgl. Abb. 12). Diese geringen Abweichungen zeigen, dass Zylinder gut aus der Punktwolke rekonstruiert werden können. Die anderen Standpunkte (Ecke und außen) stehen wegen längeren Zielweiten und größeren optischen Störungen für weniger günstige Standpunkte, was sich auch eindeutig in stärkeren Abweichungen dokumentiert.



Abb. 12: Ergebnisse der Rekonstruktion von Zylindern

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Um Anwendern die Entscheidung zu erleichtern, welcher Laserscanner für einen bestimmten Einsatz am besten geeignet ist, wurden in der Vergangenheit zahlreiche Instrumentenuntersuchungen der unterschiedlichen Laserscanner durchgeführt. Die Wahl hängt von den geplanten Anwendungen und Genauigkeitsanforderungen ab.

Die Untersuchungen des RIEGL LMS Z420i haben gezeigt, dass die Herstellerangaben im Allgemeinen zu pessimistisch angegeben werden. Für die Streckenmessung wird eine Genauigkeit von 10 mm bei einer Strecke von 50 m angegeben. Auf der Prüfstrecke der Fachhochschule Bochum wurde der Streckenmessteil des LMS Z420i untersucht und die Differenzen liegen dort innerhalb dieser Grenze. Die maximale Reichweite ist mit 1000 m angegeben, wobei Messungen von dem Messdach zeigen, dass noch größere Entfernungen gemessen werden können. Objekte in etwa 1 km Entfernung werden dann bei höchster

Auflösung mit einem Punktabstand von 8 cm erfasst. Der Entfernungsmesser ist demnach besonders leistungsstark. Der Winkelmessteil wurde mit Hilfe eines Verschiebetests überprüft. Eine Abschätzung zeigt, dass diese in der Größenordnung der Winkelauflösung von 0,004° liegt. Die Winkelmessung ist dabei als stabil anzusehen. Um eine Aussage über die Genauigkeit der erzeugten Koordinaten treffen zu können, wurde ein Testfeld an der Fassade das Fachhochschule Bochum eingerichtet. Die ermittelten Koordinaten aus der Punktwolke werden mit hochgenauen Sollkoordinaten, die tachymetrisch bestimmt worden sind, verglichen. Die Differenzen liegen innerhalb weniger Millimeter und sind unabhängig von der Position und Ausrichtung des Scanners. Der Einfluss der Objekteigenschaften wie Farbe und Material wurde an Hand unterschiedlicher Messaufbauten untersucht. Bei Messungen auf Styropor treten große Streckendifferenzen aufgrund systematischer Fehler in der Distanzmessung auf. Ebenfalls fehlerbehaftet ist die Messung auf dunkele und stark spiegelnde Oberflächen, wie beispielsweise Alufolie. Diese Einflüsse müssen beim Einsatz des Laserscanners berücksichtigt werden. Unterschiedlicher Farbflächen kann der Laserscanner nicht erkennen. Durch den Einsatz der Digitalkamera kann dieses Defizit aber umgangen werden.

Abschließend kann man sagen, dass der Laserscanner RIEGL LMS Z420i über einen leistungsstarken Entfernungsmesser verfügt, mit dem enorm hohe Reichweiten möglich sind. Durch die Kombination mit der Digitalkamera werden die Schwächen in der Auflösung der Intensität kompensiert. Dieses hybride Mess-System stellt daher eine ideale Verbindung der beiden Verfahren Laserscanning und Photogrammetrie dar.

# 5 Literaturverzeichnis

GRÜNKEMEIER, A. (2007): Instrumentenuntersuchungen des Laserscanners LMS Z420i von RIEGL, Diplomarbeit FH Bochum (unveröffentlicht)

KERN, F. (2003): Automatische Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten; Geodätische Schriftenreihe der Universität Braunschweig Heft Nr. 19

RIEGL, (2005): RiSCAN PRO Handbuch, Version 1.2.1b15

STAIGER, R. (2005): Terrestrisches Laserscanning – eine neue Universalmethode? In: Terrestrisches Laserscanning (TLS); Ein geodätisches Messverfahren mit Zukunft; DVW-Schriftenreihe, Band 48 / 2005; Wißner-Verlag, Augsburg, S. 3-15

# Influences of the 2004 jökulhlaup on ice dynamics of Skeiðarárjökull, Iceland, using Terra-ASTER imagery

SANDRO MARTINIS<sup>1</sup>, KILIAN SCHARRER<sup>2</sup>, ULRICH MÜNZER<sup>3</sup>, CHRISTOPH MAYER<sup>4</sup> & Ágúst Gudmundsson<sup>5</sup>

Zusammenfassung: On 01-06 November 2004 a volcanic eruption occurred at the subglacial Grímsvötn caldera sited under the western part of the Vatnajökull ice cap. The accompanying jökulhlaup travelled subglacially over a distance of 50 km under the Skeiðarárjökull outlet and finally flooded huge areas of the Skeiðarásandur plain in the south. Meltwater discharge peaked on 2 November and finally ended in early December, releasing a total volume of -0.8 km<sup>3</sup> from Grímsvötn. The influences of this jökulhlaup on the ice dynamics of Skeiðarárjökull were investigated applying image cross-correlation on five optical image pairs (October 2001 to July 2005) of the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) aboard the EOS Terra satellite. The average horizontal surface displacement of nearly annual periods (2001-2002, 2002-2003, 2003-2004, 2004-2005) were compared to the velocity obtained from a 64 day image pair covering the period of the jökulhlaup. A considerable acceleration of up to 0.4 m d<sup>-1</sup> over nearly the whole width of the glacier was measured during the jökulhlaup in contrast to the annual velocities. This extensive increase of surface velocity can hardly be explained by the classical jökulhlaup theory of floodwater drainage in a single subglacial conduit. Considering the results, a sheet flow or coupled sheet and tunnel flow leading to a widespread basal lubrification seems more likely.

Erscheint in Photogrammetrie • Fernerkundung • Geoinformation

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Sandro Martinis: Department f
ür Geo- und Umweltwissenschaften, LMU M
ünchen, Luisenstr. 37, 80333 M
ünchen

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Killan Scharrer: Department für Geo- und Umweltwissenschaften, LMU München, Luisenstr. 37, 80333 München

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Ulrich Münzer: Department für Geo- und Umweltwissenschaften, LMU München, Luisenstr. 37, 80333 München

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Christoph Mayer: Bayerische Akademie der Wissenschaften, Kommission für Glaziologie, Alfons-Goppel Str. 11, 80539 München

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Ágúst Gudmundsson: Fjarkönnun ehf, Furugrund 46, Kópavogur, Island
# Natural Hazard Monitoring with Reflected GPS Signals at Merzbacher Glacier Lake

## A. Helm<sup>1</sup>, H.-U. Wetzel<sup>1</sup>, W. Michajljow<sup>1</sup>, G. Beyerle<sup>1</sup>, Ch. Reigber<sup>2</sup> & M. Rothacher<sup>12</sup>

Abstract: The glaciated Tien Shan mountain chains of Kyrgyzstan represent the main reservoir of water supply of large parts of Central Asia. The regression of glaciation in this area, observed since the last two decades, caused changes in the dynamics of the glaciers. Hence, especially at the largest glacier lake of Central Asia - the Merzbacher Lake - the number of dam failures raised dramatically and causes massive damage of the infrastructure of the regions situated below the glacier outflow every year. During the Invlshik 2005 expedition (July 22 and August 13, 2005) - conducted by GFZ-Potsdam and CAIAG, Bishkek - a GPS altimetry/reflectometry experiment was installed at the border of the Merzbacher Lake at 42.196°N, 79.847°E and a height of 3271m above sea level in order to monitor changes of the lake level. A single unmodified RHCP GPS patch antenna was mounted at a secure iceberg-free location in a height of 43m above the glacier lake and was tilted 45° toward the lake surface. The 12-channel L1 frequency OpenGPS receiver allows tracking of up to 8 direct GPS signals for navigation and openloop tracking of up to 4 independent reflected GPS signals simultaneously for altimetry. Although the lake surface was fully covered with ice floes and icebergs, the OpenGPS receiver collected several height profiles every day and monitored the temporal change of the lakes water level during 15 days, between July 27 and August 10, 2005. The replenishment of the lake could be fixed from the OpenGPS measurements to a rise rate of 4cm/h, until the dam broke and the estimated water level decreased by an estimated value of 29cm/h. Single measurements state a water level drop of 13.75m between July 31 and August 3. The standard deviation (STD) of the derived height profiles - used as an estimate of the surface roughness - significantly increases and the power of the reflected signal decreases by a factor of 10.

# 1 Introduction

The glaciated Tien Shan mountain chains Kyrgyzstans represent the main reservoir of water supply of large parts of Central Asia. The regression of glaciation in this area, observed since the last two decades, caused changes in the dynamics of the glaciers. This led to an accumulation of mud slide and flow events and dam failures of glacier lakes in the high mountain area of Kyrgyzstan (Fig. 4). Especially at the largest glacier lake of Central Asia – the Merzbacher Lake – the number of dam failures raised dramatically and caused massive damage of the infrastructure of the regions situated below the glacier outflow (WETZEL et al., 2005). The Merzbacher Lake is located in a height of about 3200m and has a length of 4km, a width of 1km and a depth of about 130m. The lake is situated in the borderland and fusion area of two glaciers, the North- and South-Inylshik Glacier (Fig. 2). This glacier system – the largest glacier is a unique natural phenomenon. Caused by this situation, every year a system of cavities developed with a length of 14km within the South- Inylshik Glacier as underground drainage system for the melt water accumulated in the Merzbacher Lake.

<sup>2</sup> Central Asian Institute of Applied Geosciences,

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> GeoForschungsZentrum Potsdam, Dept. of Geodesy & Remote Sensing, Telegrafenberg, D-14473 Potsdam, Germany (helm@gfz-potsdam.de);

Timur Frunze St. 73/2, 720027 Bishkek, Kyrghyz Republic (http://www.caiag.kg)



Figure 1: Merzbacher lake on August 6 (left) and August 9 (right), 2004. Photo by Marc Roussel.

Recent dam failures occurred on: July 27/28, 2001; August 1/2, 2002; July 22/23, 2003; August 6/7, 2004 (Fig. 1) and July 13/15, 2005. During such a dam failure event the lake water level drops by several meters. Thus, the massive height change of the water surface is expected to generate a noticeable signal in the GPS signals which are reflected from the lake's water surface. The lake covered with ice floe as well as floating and grounded ice-bergs represents a reflector with highly instable topography in a highly multi-path environment. The experiment evaluates the potential of GPS reflectometry (MARTÍN-NEIRA, 1993) and the OpenGPS instrumentation (HELM et al., 2005, HELM et al., 2006) for a natural hazard monitoring scenario under complex environmental conditions. The principle of carrier phase based GPS altimetry is introduced. The data acquisition and processing is described. Finally the results are discussed.



Figure 2: The North- and South-Inylshik glacier system has a length of more than 65km and comprises an area of more than 815km<sup>2</sup>.

## 2 Altimetry with GPS L1 carrier phase-delay observations

Simple geometric considerations show that the path traveled by the reflected GPS signal ray is longer compared to the direct ray (Fig. 3, bottom right panel) and that the observed path difference  $\delta$  can be expressed as function of receiver height H and elevation angle  $\varepsilon$  at the specular reflection point. Due to the relative change of the position of receiver and transmitting satellite, the delay and path length between direct and reflected signal slightly changes over time. If observed direct and reflected signal are coherent, both signals superpose each other and interfere. Varying fluctuations in the GPS C/A code correlation power can be observed at the estimated delay of the reflection. The recorded amplitude fluctuations are used to determine from the GPS L1 carrier phase-delay the relative height variation at the specular reflection point. The absolute height of the reflecting surface can be derived from carrier phase observations by detrending the relative height profile. Therefore the assumption has to be made that the reflecting water/ice surface is horizontal, or known slopes have been corrected beforehand.



Lake level of Merzbacher lake on July 30, 2005 (top, left panel); on August 3, 2005 (top, right panel); on August 5, 2005 (bottom, left panel). Principle of phase observations of Figure 3: reflected GPS signals (bottom, right panel).



Figure 4: Natural hazard risks in high mountains regions of eastern Kyrgyztan.

# 3 Data Acquisition and Processing

During the Inylshik Expedition, conducted between July 22 and August 13, 2005, the OpenGPS experiment was installed at the south-east border of the Merzbacher Lake at 42.197-N/79.847-E in a distance of about 500m toward the ice dam of the South-Invlshik Glacier. A single right hand circular polarized (RHCP) patch antenna was mounted on a geodetic tripod in a height of 1.93m above the ground and was tilted 45 toward the horizon. With the antenna oriented in west direction (260- azimuth) the OpenGPS receiver monitored the temporal changes of the lakes water level during 15 days, between July 27 and August 10 and recorded more than 400 datasets. The OpenGPS software receiver is an implementation of Clifford Kelley's OpenSourceGPS (Kelley & Baker, 2006) for a PCI bus interface. The OpenGPS receiver allows tracking of up to 8 direct GPS signals for navigation and openloop-tracking of up to 4 independent reflected GPS signals simultaneously for altimetry. Simulation calculations based on ephemeris data of July 30, 2005 illustrate the area of the Merzbacher lake which can be covered with specular reflection monitoring points. Fig. 5, panel A shows the possible location of specular reflection points of visible GPS satellites (prn's) which can be observed on 30 July 2005 at the Inylshik receiver location (marked by a circle with a cross). Panel B shows the position of the satellites. Panel C shows the time schedule of satellite visibility. In the presented simulation data the satellite observations are limited to elevations between 2- and 75- and -160- and 30- azimuth. With an estimated antenna height of 45m above the reflector 3-6 reflection events can be expected at the Merzbacher lake location throughout the day in parallel.





Precise calibration height measurements were conducted in parallel with a Trimble 4000 geodetic receiver at the OpenGPS receiver antenna position at 3273.35m (Fig. 3), and at the lake level of Merzbacher lake on July 30 (Fig. 10, left) and August 1, 2005 at 3228.56m and 3228.51m, respectively.



Reflected GPS I and Q data recording (A), phase (B), power (C) and relative height profile Figure 6: (D) of Merzbacher lake on July 31, 2005 starting at 11:21:11 UTC.



Height profile of Merzbacher lake on July 31, 2005 starting at 11:21:11 UTC (left) and on Figure 7: August 3, 2005 starting at 11:08:20.



Height profile of Merzbacher lake on August 3, 2005 starting at 04:31:19 UTC (left) and Figure 8: on August 6, 2005 starting at 04:00:54 UTC (right).

During a reflection event the OpenGPS receiver records the in-phase (I) and quad-phase (Q) correlation data with a rate of 50Hz. Due to the use of the hardware correlator chip (ZARLINK, 2001) no raw data stream had to be recorded and the file size mainly varied between 2.5Mb and 44Mb. A 25min long binary data record of one dedicated PRN reflection event has a size of 6.4Mb and the final height profile can be processed on a standard Linux PC within 10sec. The influence of the direct GPS signal is suppressed by applying a 30s long

running mean filter to the correlation data. Additionally, I and Q are filtered by a 0.4s long running mean filter (Fig. 6, A). The phase is calculated from a four quadrant arctangent (Fig. 6, B) and unwrapped. The path difference  $\delta$  between the direct and reflected signal is calculated by multiplying the phase with the wavelength  $\lambda_{\mu}$  of the Doppler corrected carrier frequency. Cycle slips can be corrected for by inserting multiples of  $\lambda_{\mu}$  if the measured path deviates from a modeled path by more than a pre-defined threshold. With the cycle slip corrected time series of  $\delta$  and the known geometry of receiver, transmitter and reflection point (continuously changing with time and assuming a spherical Earth), the relative height change of the reflection point can be calculated. An absolute height profile can be generated (Fig. 6, D) by varying the estimated starting reflector height until the resulting absolute height profile is detrended. Known height gradients and the influence of the troposphere have to be removed assuming a horizontal reflecting surface. The influence of the troposphere is calculated from the European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF) data and ray-tracing analysis. The relative height gradient is derived from the EIGENCG01C geoid.





## 4 Discussion

The significant changes of the Merzbacher lake height, topography and surface structure visually observed during the experiment from the OpenGPS receiver location are documented in Fig. 3: The top left photo shows the lake condition until July 30, 2005. Since the reported dam failure on July 13/15 the replenishment of the lake could be observed. Except very large icebergs most smaller icebergs and ice floes are floating. In the background of the picture the height of the maximum water level can be estimated by the visible old shoreline and the grounded small icebergs which can be observed at the north-east shore of the Merzbacher lake. On August 3 the situation already changed dramatically (Fig. 3, top right). The water level dropped massively and grounded icebergs can be observed near the shoreline. At the center of the lake the ice floe covered water still dominates the lake surface characteristics.

On August 5 (Fig. 3, bottom left) the water content which has been stored in the lake completely vanished. The ice floes and icebergs ran aground at the bottom sediments of the lake. Fig. 6 represents a typical data set taken on July 31, 2005. A strong interferometric signal can be seen in the I and Q data (Fig. 6, A).



Left: Trimble calibration measurement of the lake level of Merzbacher lake on July 30, 2005, +4cm/hour rising water level. Right: Location of calibration measurement after the second water flooding of the Merzbacher lake on August 3, 2005.

Fig. 7, left, shows the height results obtained from an observation measured on July 31, 2005. The data extract shows the received reflected signals of PRN 8 between 6.9 and 8.4elevation. From the clearly visible interferometric pattern which can be observed in the correlation data and the amplitude of the signal an undisturbed phase can be calculated. No cycle slip has to be corrected. The detrended height profile states a mean height of 3227.33m with a STD of 0.05m. The derived height profile has a length of 18m and is dominated by sharp saw tooth formed structures, e.g. between 346m and 354m distance to the receiver. The derived absolute heights deviate by 1.26m and 1.21m from the calibration measurement made on July 30 and August 1, respectively. On August 3, 2005 a data set was measured (Fig. 7, right). Again the GPS signal of PRN 8 was observed between 4.7 and 6.2 elevation. The correlation data, the phase data and amplitude behavior appear quite similar to the data discussed previously. Compared to the aforementioned measurement much smoother height fluctuations can be observed in the derived detrended height profile. The detrended height profile states a mean height of 3213.58m with a STD of 0.06m. Thus, due to both reflectometry measurements on July 31 and August 3 the lake level dropped by an amount of 13.75m. This large amount agrees with the estimates made by visual observations. Fig. 8, left, shows a data set, recorded at the same day (August 3, 2005). PRN 11 was observed between 29.5- and 28.4- elevation. Again a strong interferometric pattern can be observed in the correlation data and the amplitude, indicating a reflected signal. A bending of the height profile can be observed in a range of  $\pm 0.2m$  between 188m and 196m distance to the receiver which complicates the detrending process. The detrended height profile states a mean height of 3167.11m with a STD of 0.03m. The derived absolute heights deviate by 61.40m from the calibration measurement made on August 1. The derived height values clearly underestimate the lake height at August 3. Most likely the recorded signal was reflected by a sloped surface of an iceberg or ice floe. Therefore only a comparably short profile with a length of 8m could be observed. Thus, the unknown slope could not be corrected for and the derived height is biased. After August 3, 2005 the lake surface conditions changed again and the water content

which has been stored in the lake completely vanished. The lake surface now consists of a rough topography of a scattered and inhomogeneous distributed conglomerate of icebergs and ice floes which are grounded on humid fineclastic lake sediment. Only very short data extracts can be found for successful processing. Fig. 8, right, shows a typical profile recorded on August 6. Observations of PRN 19 were used at elevations between 21.4- down to 20.8-. The signal strength of the registered correlation data significantly decreased. A much higher amount of noise can be observed in the correlation data and the derived phase. Although a noisy but recognizable phase indicates a reflection, in comparison to the examples shown before the interferometric pattern is hardly noticeable in the amplitude itself. Caused by the noisy and degraded phase data several cycle slips had to be corrected. The detrended height profile states a mean height of 3148.41m with a STD of 0.05m. Again the derived absolute heights deviate by 80.10m from the calibration measurement made on August 1. The derived height values underestimate the lake height at August 3. Again the recorded signal must be reflected by a sloped surface of an iceberg or ice floe. Therefore only a comparable short profile with a length of 8m could be observed. Thus, the unknown slope could not be corrected and the derived height is biased. It has to be noted, that the specular reflection point of the measured reflected GPS signal is not bound to the horizontal lake surface but can be situated at any point between satellite and receiver antenna which meets the reflection geometric boundary conditions.

Taking all 56 selected and individually processed data sets into account, the most significant changes during the observation period can be seen in the reflected GPS signal power. During the time period from July 28 (day of year(doy) 209) to August 1 (doy 213) a slow refilling process took part. The structure and the size of the reflecting lake surface did not significantly change during that time span. The ice floe covered water reflected a comparably high fraction toward the OpenGPS antenna (see Fig. 3, top left). During the following 2 days on August 2 (doy 214) and 3 (doy 215) the water discharged. Thus, the area of ice floe covered water which represents a comparable planar and horizontal reflecting surface decreased and the number of grounded icebergs increased (see Fig. 3, top right). The former lake surface starts to transform into a discontinuous surface of small horizontal ice floe covered areas with insets of larger icebergs representing small reflecting surfaces of all possible slopes. From August 4 (doy 216) on the lake water completely discharged (see Fig. 3, bottom left). Only a small fraction of the GPS signal is reflected from the scattered ice surface. The derived mean height values vary within a large height range as the reflections most probably are originated from different sloped surfaces at different locations. Fig. 9 shows all selected datasets geolocated at the Merzbacher lake site. Each height profile location and length is represented by a black line. The derived mean height is plotted at the mean reflection location and represented by a colored circle. The color scale represents the time sequence the data sets were recorded. Blue circles represent earlier measurements, mainly recorded in July 2005 while green circles represent later measurements, mainly recorded in August 2005. The diameter of the circles represents the derived mean height. A lower reflector height is represented by a small diameter, a higher reflector by a larger diameter. A red cross, marked by P1, assigns the location of the two precise Trimble calibration measurements. The data show a good spatial coverage of the southern part of the Merzbacher lake surface. No systematic pattern can be seen in the geolocated data. Measurements after August 7 (doy 219) tend to be located near to the receiver.



Mean absolute height of each evaluated height profile recorded from the lake area between July 28 (doy 209) and August 4 (doy 216), 2005. Two Trimble height calibration Figure 11: measurements (magenta cross/blue arrow) indicate the measured water level rise rate.

Fig. 11 shows selected data sets during the time span with reasonable reflection power. Blue circles represent the mean height from the corrected relative height profiles. The two calibration measurements are marked by a magenta cross. Between July 28 (doy 209) and July 30 (doy 211) three measurements can be observed which state a mean height around 3220m and are biased by more than 7m in comparison with the calibration measurement on July 30. These measurements are excluded from the calculation of the linear height trend of the measurements recorded from July 28 to August 1 (doy 213). A mean rise rate of 2cm/h or 0.48m/day can be calculated from the selected height profiles during that time period which show good agreement with the directly measured rate of 4cm/h at the calibration point on July 30. The higher value measured in the afternoon at the calibration point can be explained by the higher melting rates expected in the afternoon hours due to the sun radiation during daytime. On August 1 already a decrease rate of 5cm/h could be directly measured at the calibration point. Between August 1 and August 3 (doy 215) a second linear trend is calculated with a mean decrease rate of 29cm/h or 7.0m/day. These values are supported by GPS positional measurements made directly at the ice dam of the South-Inylshik glacier. The measurements show vertical movements of up to 0.8m/day and vertical motions not related to ablation of up to -15m/day after the dam break (Mayer et al., 2006) expressing the sliding movement of the calving ice dam segments into the drained lake body. 5

#### 5 Conclusion and Outlook

The single-frequency L1 OpenGPS receiver with a single wide field-of-view patch antenna (45- tilt angle) allows for tracking of up to 8 direct GPS signals for navigation and open-loop tracking of up to 4 independent reflected GPS signals for altimetry simultaneously. The receiver, hosted in a standard PC, was not designed for high mountain areas but worked stable and autonomously. The power supply realized by solar panels could be kept stable during daytime. Although the area of ice-free water surface was small, strong GPS signal reflections could be observed all days, especially from ice covered areas. Two GPS calibration measurements could fix the inversion of the water level rise rate from 4cm/h to -5cm/h at the end of the replenishment process. During the observation period a dam failure event could be observed which took place after August 1, 2005 and the water level dropped several meter within a few hours. After August 1 the STD of the height profiles, used as an estimate of the surface roughness, increased and the power of the reflected signal significantly decreased. The GPS observations are conducted in a highly multi-path environment. Thus, the data sets have to be carefully classified to recordings originated from the lake surface and those originated from sloped ice surfaces. The replenishment of the lake could be fixed from the

OpenGPS measurements to a rise rate of 4cm/h, until the dam broke and the estimated water level decreased by an estimated value of 29cm/h. Single measurements state a water level drop of 13.75m between July 31 and August 3. Hence, the dam failure event can be correlated to the observed OpenGPS reflection data and the feasibility of a GPS reflectometry based hazard warning system could be shown. Our results suggest that open-loop tracking is possible even at difficult reflection surfaces and environmental conditions and low observation heights with low-gain and wide field-of-view antennas. This shows the potential of GPS reflectometry for remote water level and surface roughness monitoring from a safe position in case in-situ measurements are not possible or dangerous to accomplish because of a non-accessible topography or sensors getting destroyed by a highly dynamic, glaciated environment typical for a high mountain glacier. Currently simulation studies are prepared to better understand the reflection process at GPS frequencies at a water/air and ice/air interface. Receiver developments are performed to use the potential of a modern, small, low-power commercial off-the-shelf dual-frequency GPS receiver for reflectometry. Combining reflection observations at two frequencies potentially enlarge the observation wavelength which will allow for coherent phase observations at rougher surface conditions. Follow-on activities are planned to carefully monitor and understand the long-term and short-term dynamic changes in the hydrologic system of the Tien Shan in order to fulfill the increasing vital and economic demands for water supply and hydro power and to preserve the precious resource water for long-term usage within the whole region of Central Asia.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This work would not have been possible without the open source projects OpenSource GPS and RTAILinux. We thank C. Kelley and the developers of RTAI-Linux for making their work available. We thank P. Steigenberger, T. Schmidt, R. Galas, W. Burghardt, M. Ludwig, C. Selke and R. Winter for their help and technical support. NIMA provided SRTM topographic data. The ECMWF provided meteorological analysis fields. Gratefully acknowledged is the cooperation of the members of the CAIAG institute in Bishkek during the Inylshik2005 expedition, especially thanks to B. Moldobekov, E. Bargen and A. Ainbekova. I thank C. Mayer, A. Lambrecht, W. Hagg, S. Nowak, M. Roussel and F. Ng for all support, discussion and data during the Inylshik2005 experiments. I thank all members of the speleology fond for all heartful help in field during the Inylshik2005 expedition, especially thanks to my mountain guide and friend Vasili Popov who performed the Trimble GPS calibration measurements.

## REFERENCES

- HELM, A., BEYERLE, G. & NITSCHKE, M., 2005. Detection of coherent reflections with GPS bipath interferometry. Canadian Journal of Remote Sensing, submitted. http://arxiv.org/abs/physics/0407091.
- HELM, A., BEYERLE, G., REIGBER, C. & ROTHACHER, M., 2006. Coastal altimetry at the Baltic Sea off-shore Rügen using L1 carrierphase-delay observations of reflected GPS signals at low elevation angles. In: GNSSR'06 workshop on GNSSR reflections, ESTEC, Netherland.
- KELLEY, C. & BAKER, D., 2006. OpenSource GPS: A hardware/software platform for learning GPS: Parti, hardware. GPS World pp. 58–62.
- MARTÍN-NEIRA, M., 1993. A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): Application to ocean altimetry. ESA Journal 17, pp. 331–355.

- MAYER, C., LAMBRECHT, A., HAAG, W. & EISEN, O., 2006. The ice-flux into Merzbacher Lake, Inylchek Glacier, Kyrgyzstan. Vol. 8, pp. SRef–ID: 1607–7962/gra/EGU06–A– 08183.
- WETZEL, H.-U., REIGBER, A., RICHTER, A. & MICHAJLJOW, W., 2005. Gletschermonitoring und Gletscherseebrüche am Inyltschik (ZentralerTienshan)- Interpretation mit optischen und Radarsatelliten. In: Tagungsband DGPF Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung, Rostock.

ZARLINK, 2001. GP2021 GPS 12 Channel Correlator. DS4077-3.2 edn. http://www.zarlink.com.

# GIS Integrated Geologic and Tectonic Evaluations of Remote Sensing Data from Southwest-Germany and Northwest-Switzerland

## BARBARA THEILEN-WILLIGE <sup>1</sup>

Abstract: For monitoring natural hazards and for assessing risks data availability is crucial. GIS and satellite observations can help considerably to show vulnerable areas, enhance mapping, and ameliorate the understanding of hazards and to detect risk areas for infrastructural facilities. For the detection of hazard prone sites the GIS embedded geologic-tectonic evaluations of different satellite data from Southwest Germany and Northern Switzerland have been carried out. The investigations were focused on the detection of areas susceptible to natural hazards as landslides, flooding or earthquakes. Local site conditions influencing earthquake damage intensity can be visualized by means of GIS integrated remote sensing data. SRTM DEM based morphometric maps as height maps, hillshade, slope, minimum and maximum curvature maps contribute to the detection of causal factors related to landslides. Causal factors as steep slope gradients, high curvature, critical lithologic units or high fault density can be extracted and visualized as layers in a GIS Thus, remote sensing data contribute to a GIS database which is essential for hazard preparedness and mitigation planning.

## 1 Introduction

This contribution is concerned with natural environmental factors, especially with the understanding of the complex interactions of environmental factors and their influence on damage intensity in case of natural hazards. It addresses problems caused by geologic processes and hazards as earthquakes, landslides or flooding.

The use of GIS integrated remote sensing data in the scope of environmental studies has been a continuous process taking place over the last decades (GUPTA, 2003). Data from earth observing satellites have become a valuable supporting tool for natural hazard damage. Earth observation satellites as LANDSAT, SPOT, IKONOS, QUICKBIRD, ERS or ENVISAT with increasing capabilities in terms of spatial, temporal and spectral resolution allow a more efficient, reliable and affordable monitoring over time. Thus, remote sensing technology has become a fundamental input for Geoinformation Systems (GIS), especially for Natural Hazard Information Systems. The design of a common GIS database structure - always open to new data - can greatly contribute to the homogenisation of methodologies and procedures of natural hazard risk management requiring an approach by integrating remote sensing data, geologic, geophysic, seismotectonic and topographic data and catalogues of historical hazardous events. This can be demonstrated by the example of SW-Germany and N-Switzerland.

# 2 Geologic Setting

The geologic structure of Southwest Germany / Northern Switzerland is governed by the ongoing plate tectonic activity and geodynamic processes in the Alpine region which are accompanied by relative motions between the Eurasian plate and the Adriatic promontory of the African plate. The Alps are representing the European segment of the Tertiary collision

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Dr. habil. Barbara Theilen-Willige, Birkenweg 2, D-78333 Stockach

zone between the African and the Eurasian continents. The major tectonic units in the area of SW-Germany and N-Switzerland are the Molasse Basin, the Jura Mountains and the Alps (GIARDINI et al., 2004). The Alpine foreland underwent compressive stress as a result of crustal shortening. The entire central European plate gives way to the penetrating Italy/ Adria Block by a NE-SW extension mechanism. Present convergence rates of up to 9 mm/vr have been estimated for the relative motion between Africa and Europe (KASTRUP et al., 2004). Vertical crustal movements are mainly related to the exhumation of the Alps and an enhanced seismic activity along the Alpine arc. During the early Miocene (about 23 Ma), the continuing indentation of the Adriatic plate caused the uplift of the Alps, while the debris of the rising mountains were deposited in the foreland basin to the north to form the Molasse Basin. The deformation started less than 12 Myr with the overthrust of the most southern parts of the Molasse (Subalpine Molasse) and produced a slight folding of the entire Molasse section. Finally, detachment along Triassic evaporites in northwestern Switzerland and eastern France and continued compressional deformation formed the Jura Mountains around 3-5 Ma ago. Deformation is ongoing: geodetic measurements show that highest rates of ongoing vertical uplift in the Alps of 1.5 mm/vr occur in the Wallis and in Graubünden (SCHLATTER, 2006, p.207).

Crustal convergence within the Alpine collision zone still is the driving force for the tectonic structures in the Alpine foreland causing compression and a block-wise tectonic structure. Continuous crustal shortening resulted in the most recent tectonic movements north of the Alps which affected the foreland basin. Whether the foreland is still active as a fold and thrust belt or whether this deformation has ceased or changed is subject to debate (KASTRUP et al., 2004).

# 3 Approach

ENVISAT ASAR, ERS, LANDSAT ETM, SIR-C/ X-SAR data and Digital Elevation (DEM) data derived by the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM, 2000) were investigated in order to delineate areas of natural hazard susceptibility. Digital image processing methods used to enhance satellite radar and LANDSAT ETM imageries and to produce morphometric maps (such as hillshade, slope, minimum and maximum curvature maps) based on SRTM DEM data, contribute to the detection of morphologic traces that might be related to past hazardous events. This could allow the detection of future potential hazard source regions. Fig.1 shows how the causal factors for natural hazards are extracted systematically: From slope gradient maps are extracted those areas with the steepest slopes and from curvature maps the areas with the highest curvature as these are susceptible to land-slides, from height maps the lowest areas susceptible to flooding, from flow accumulations maps areas with highest flow accumulations. Height maps help to search for topographic depressions, which are often linked with water accumulations and wetlands. Linear morphologic features (lineaments) visible on morphometric maps and LANDSAT and radar imageries are often related to traces of faults and fractures in the subsurface. This can be demonstrated by the example of the Lake Constance area.

# 4 Evaluations of Remote Sensing and GIS Data

## 4.1 Lineament Analysis for the Detection of Subsurface Structures

Structural features visible on satellite imageries area were mapped in order to investigate the tectonic setting and to detect surface traces of fracture and fault zones. Special attention is focused on the detection of neotectonic features and to find and map not yet known fault

segments and structures. An overview of the mapped linear features based on different remote sensing data as LANDSAT ETM, ENVISAT and SRTM DEM derived morphometric maps is shown in Fig.2.

Steps in a Natural Hazard Information System (ArcGIS): Deriving DEM based Morphometric Maps and Extraction of Potential Causal Factors



Figure 1. Extraction of causal / preparatory factor influencing susceptibility to natural hazards such as mass movements and flooding or damage amplification during earthquakes due to local site conditions

The next figures show perspective views of the ASAR image demonstrating their value for the detecting of larger linear features that might be related to the tectonic development in this area. Some lineaments can be observed over a distance of more than 100 km (Fig.3).

Traces of neotectonic movements are detectable on satellite imageries: Evidence for neotectonism is indicated by geomorphologic features (distortion of alluvial fans, linear scarps, etc.), especially by the drainage pattern (bending and off-setting of river segments). Examples for such geomorphological traces, obviously related to neotectonic activity, are shown from the Alpine collision zone into the foreland south of Lake Zuerich using Envisat ASAR and LANDSAT scenes, merged with the SRTM hillshade map. Traces of orogenic, crustal foreshortening from the Alpine collision zone can be detected by parallel and linear, SW-NE oriented, hills, valleys and depressions (Fig.4).

Lineament analysis based on satellite imageries of areas covered by Pleistocene and Holocene sediments contributes to the detection of linear features that might be related to neotectonic or recent movements in the subsurface. Linear features can be detected on satellite radar imageries from the drumlin-fields area near Constance and near Salem as presented in Fig.5. The drumlins are oval shaped smaller hills formed by glaciers of about approximately 300 m length, 100 m width and 20 m height. The Würm-aged (+/-15.000 years ago, SCHREINER, 1992, p.133) drumlin fields seems to be structurally disrupted as indicated by arrows on Fig.5.



Figure 2. Lineament map based on LANDSAT ETM, ENVISAT ASAR imageries and SRTM DEM derived morphometric maps



Figure 3. Perspective view of the ENVISAT ASAR scene



Figure 4a. Linear and parallel arrangement of the drainage pattern visible on the LANDSAT image - traces of the Alpine compression (?)



Figure 4 b. Valleys and depressions parallel to the Alpine compression front visible on the ENVISAT ASAR image

The alignment of Post-pleistocene scarps and depressions in principally SW-NE and NW-SE directions probably traces the most recent tectonic stress pattern.







Parallell, SW-NE oriented scarps and valleys within the Pleistocene drumlins (15.000 -12.000 years ago) near Constance



Figure 5 Linear features visible on a SIR C/X-SAR (VV) scene and ENVISAT ASAR scene obviously tracing recent tectonic influence on the Holocene sediments (?). The linear features are oriented mainly in SW-NE direction, parallell to the Alpine front

One explanation for the parallell, SW-NE oriented, morphologic structure of the drumlins could be compressive deformation caused by Pleistocene glaciers. However, a deformation pattern in the drumlins due to glacial compression would not be so linear and constant; it would probably have been created more curvi-linear, following the glaciers course along the topography. It seems to be more evident that the linear features in the Pleistocene and Holocene sediments are tracing recent tectonic influence. Obviously it can be assumed that the Alpine foreland is still prone to recent movements.

#### 4.2 Detection of Landslide Causative Factors

The glaciations of the Quaternary period were of great importance in the sculpturing of the Alps and Alpine foreland (GEYER et al., 2003). Vast ice masses moved through the valleys, transforming them into deep troughs with steep walls leaving glacial deposits. Glacial rebound and glacial erosion of the slope toe play an important role for slope instability as in the Lake Constance area. Most of the landslides occur in those valleys covered by large glaciers during the Pleistocene (Fig.6). Remote sensing data and further geodata from the Lake Constance area at the south-western part of Germany were used as example for mapping causal factors related to the occurrence of landslides such as surface morphology, structural and lithologic properties, land cover, and at least, temporal changes of these factors.



Figure 6. Landslide occurrence in the Lake Constance area

Landslides triggered by seismic shock are documented: During the 16.11.1911 – earthquake event landslides in areas with existing slope instabilities demonstrated the existence of potentially secondary effects (SIEBERG, 1925). The next figure (Fig.7) summarizes some of the main causal factors influencing landslide susceptibility in the Lake Constance area as critical lithologic units, fault and fracture zones, slope gradients and curvatures, or earthquake

occur-rence. When high precipitations are concentrated within a short time period these areas with high slope degrees (>20°), high curvatures, higher fracture density and outcrop of "Untere Suüßwassermolasse" are more susceptible to landslides than the environment In Fig.8 the main factors are presented playing a role in relation to natural hazards.



Figure 7. Causal factors influencing landslide susceptibility in the Western Lake Constance area (Tectonic, lithologic and earthquake zonation data: Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Baden-Württemberg ,1998)

# 5 Conclusions

Satellite observations can help considerably to show vulnerable areas, enhance mapping, and ameliorate the understanding of hazards and their complex interactions. The main advantages to be outlined refer to the spatially extending information collection, data base creation and the monitoring capabilities. Thus, the path of sytematic integration of satellite data analysis results into hazard zone mapping is demonstrated that can be easily adopted for other areas.

## Acknowledments

The ERS and ENVISAT satellite radar data were investigated in the scope of the ENVISAT Mission (AO ID AEO.211). The author thanks ESA /ESRIN for providing ENVISAT ASAR and ERS data of Northeast Venezuela, Central Italy and SW-Germany free of charge being part of the support as Principle Investigator.

The support of the European Community, Project funded by the European Community under the 'Energy, Environment and Sustainable Development Programme', Contract N° : EVG1-CT2002-00061, Project N° : EVG1-2001-00061, Brussels, from 2003-2006 is kindly acknowledged.

SIR-C/X-SAR data were provided by German Aerospace Center (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR), Oberpfaffenhofen in the scope of the Shuttle Radar Topography Mission (Principle Investigator: AO\_029).



Figure 8 Factors influencing susceptibility to natural hazards:

slope degree > 20° and high curvatures – susceptible to mass movements, unconsolidated sedimentary covers and higher groundwater tables in depressions and broader valleys – susceptible to soil amplification, compaction and liquefaction in case of stronger earthquakes,

heights below 400 m – susceptible to flooding and high groundwater tables,

#### high density of tectonic and structural features - susceptible to neotectonic movements ?

## References

- Conrad, O. (1998): Ableitung hydrologisch relevanter Reliefparameter aus einem Digitalen Geländemodell (am Beispiel des Einzugsgebietes Linnengrund / Kaufunger Wald ).-Diplomarbeit angefertigt am Institut für Geographie der Georg-August-Universität zu Göttingen
- Franzke, H.- J., Werner W. & Wetzel, H.-U.(2003): Die Anwendung von Satellitenbilddaten zur tektonischen Analyse des Schwarzwalds und des angrenzenden Oberrheingrabens.-Jh. Landesamt f. Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Freiburg im Breisgau, Baden-Württemberg, 39, S. 25–54, 11 Abb., 30. Oktober 2003
- Franzke, H. J., Wetzel, H.-U. & Werner, W. (2000): Das Strukturmuster des Schwarzwaldes aus der Sicht bruchtektonisch interpretierter TM- und ERS-1-Daten. - Publ. Deutsche Ges. Photogrammetrie u. Fernerkundung (DGPF), Bd. 8: 481-493; Berlin

- Giardini, D., Wiemers, S., F\u00e4h, D. & Deichmann, N. (2004): Seismic Hazard Assessment of Switzerland, 2004.- Swiss Seismological Service, ETH Z\u00fcrich, Z\u00fcrich, Switzerland
- Geyer, O., Schober, Th. & Geyer, M. (2003): Sammlung geologischer Führer 94 Die Hochrhein-Regionen zwischen Bodensee und Basel.- Gebr. Bornträger, Berlin – Stuttgart,526 p.
- Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Baden-Württemberg (1998): Geowissenschaftliche Übersichtskarten von Baden-Württemberg, 1: 350.000, 20 landesweite Karten für Planung, Wirtschaft und Umwelt, CD
- Giardini,D.,Wiemer,S.,Fäh,D.&Deichmann,N. (2004). Seismic Hazard Assessment of Switzerland, 2004.- Swiss Seismological Service, ETH Zürich, Zürich, Switzerland
- Gupta,R.P.(2003). Remote Sensing in Geology. Springer-Verlag, Berlin- Heidelberg-New York
- Grünthal, G., Mayer-Rosa, D., Lenhardt, W. A. (1998): Abschätzung der Erdbebengefährdung für die D-A-CH-Staaten – Deutschland, Österreich, Schweiz.- Bautechnik,10: 3-17, 6 Abb., 2 Tab., Verl. Ernst & Sohn; Stuttgart
- Kastrup, U., Zoback, M.L., Deichmann, N., Evans, K.F., Giardini, D., and Michael, A.J. (2004): Stress field variations in the Swiss Alps and the northern Alpine foreland derived from inversion of fault plane solutions.-Journal of Geophysical Research, Vol. 109, B01402, doi:10.1029/2003JB002550, 2004
- Neuhäuser, B.(2005): GIS-gestützte, probabilistische Beurteilung der Gefährdung durch Massenbewegungen - Einsatz von Geoinformationssystemen (GIS) zur Multikriterien Beurteilung der Rutschanfälligkeit dargestellt am Beispiel der Schwäbischen Alb.-Master Thesis, eingereicht am Institut für Geographie und Angewandte Geoinformatik der Paris Lodron Universität Salzburg zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science in Geographical Information Science & Systems MSc (GIS)
- Ruff, M. (2005): GIS-gestützte Risikoanalyse für Rutschungen und Felsstürze in den Ostalpen (Vorarlberg, Österreich). - 144 S., Dissertation Fakultät Bau-, Geo- und Umweltwissenschaften, Universität Karlsruhe (TH); Karlsruhe, http://www.uvka.de/univerlag/volltexte/2005/46/
- Schlatterer, A.(2006): Das neue Landeshöhennetz der Schweiz. Diss. ETH Zürich Nr.16840, Zürich
- Schmidt, J. & Dikau, R.(1999): Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models- semantics, methods, future needs.- in: Dikau, R. & Saurer, H. (Hrsg.,1999): GIS for Earth Surface Systems – Analysis and Modelling of the Natural Environment,153-173, Gebrüder Bornträger Berlin, Stuttgart
- Schreiner, A.(1992):Geologische Karte 1:50.000, Erläuterungen zu Blatt Hegau und westlicher Bodensee.-Geologisches Landesamt Baden-Württemberg (Hrsg.), Freiburg-Stuttgart
- Schneider, G.(2004). Erdbeben Eine Einführung für Geowissenschaftler und Bauingenieure: 246 p., Spektrum Akademischer Verlag, Elsevier, München
- Sieberg, A. & Lais, R.(1925). Das mitteleuropäische Erdbeben vom 16.11.1911, Bearbeitung der makroseismischen Beobachtungen.- Veröff. Reichsanstalt für Erdbebenforschung, 4, Jena
- Theilen-Willige, B.(2000): Seismic Hazard Zoning based on Evaluations of Remote Sensing Data (LANDSAT TM-/SIR-C/X-SAR-Radar) of the Lake Constance Area/ Southwest Germany in Comparison with Field Check.- Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation (PFG),1,19-32, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- Theilen-Willige, B.(2002): Beitrag der Fernerkundung zur Erdbebenvorsorge Fernerkundungs-methoden bei der Erfassung von durch Erdbeben und durch Erdbebenfolgeschäden gefährdeten Bereichen.- in: Fiedler, F.(2002),Hrsg.):

Naturkatastrophen in Mittelgebirgsregionen, Verlag für Wissenschaft und Forschung GmbH, VWF, Berlin, 245-270

Wood, J. (2004): The Geomorphological Characterisation of Digital Elevation Models.-Thesis,

http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/phd/

#### Internet Data Sources:

#### Satellite Data:

LANDSAT ETM and SRTM data: Earth Science Data Interface (ESDI) at the Global Land Cover Facility, University of Maryland, USA:

http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp

NASA: ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version1/Eurasia/GTOPO30

DEM data: DataServer: Free maps and GIS data

http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp

#### Earthquake data:

http://www.seismologie.bgr.de/www/sdac/erdbeben/catalogue\_ger.htm

# Remote Sensing analysis of recent tectonics: The Erzgebirge and the Egergraben

#### ALEXANDRA KÄBNER, RICHARD GLOAGUEN & KLAUS STANEK

Abstract: River analysis is an important tool in geomorphology, since the drainage network is very sensitive to geological and tectonic processes. Different techniques can be applied to gather neotectonic information from DEMs. Both the drainage system in map view and longitudinal profiles extracted from DEMs were used in this study.

Correlation between faults and streams can be quantified by calculating a reduced covariance. Different gradient indices were used to examine longitudinal profiles. With the help of river terraces an uplift rate of a small fault in the Erzgebirge was calculated.

#### 1 Introduction

Bedrock channels provide the primary non-glacial mechanism of incision into bedrock. The rate at which channels incise into bedrock sets the rate at which the rest of the landscape surface evolves, and hence controls the response time of such landscapes to tectonic forcing (HANCOCK



Figure 1: Location of the area of investigation

et al., 1998). Therefore the study of drainage network and longitudinal profiles is a suitable approach to explore neotectonics. In Central Europe one of the most promising sites for neotectonic studies is the Egerrift containing the Vogtland, which is famous for its frequently occuring earthquake swarms. Some minor seismic activity were recorded further east during the last millenium (LEYDECKER 2005).

The area of interest is situated in the middle eastern part of Germany and the northern part of the Czech Republic (Figure 1). The Eger Rift is one of the dominant structures

of the European Cenozoic Rift System (ZIEGLER and DÉZES, 2005).

The Erzgebirge is tilted upward around an ENE striking axis. It shows a slowly increasing elevation from the imaginable axis of rotation to the ridge. The most remarkable morphologic features of the Erzgebirge are the deeply incised streams (KÄUBLER, 1959). The Erzgebirge constitutes the northern rift flank of the Egerrift. The Egerrift itself and its southern border fault and rift flank are also part of the area of investigation. To the East the Elbe zone forms the boundary of the area of interest. The western edge is the Fichtelgebirge.

The Egergraben is a very young volcanotectonic rift (WALTHER, 1995). The common opinion is that the development of the rift took place during Neogene and ended in Pleistocene.

With the help of geomorphological methods applied to digital elevation models we want to show recent tectonic activity in the Eger Rift and the Erzgebirge.

## 2 Data

The drainage system was extracted with the program PCI Geomatica. The techniques used in this program were described by JENSON & DOMINGUE (1988). Calculations or decisions are made for every cell based on the values in the eight cells that are spatially adjacent in the raster. One result of this procedure is a raster containing the catchment area for every pixel. Additionally the drainage system was extracted and vectorized for further analysis.

To avoid loss of data, the original (unfilled) DEM was used to compute longitudinal profiles. Single vectorized streams were utilized as profiles in the DEM as well as in the catchment area raster. A SRTM-3 (Shuttle Radar Topography Mission)-DEM was used in this study, which has a vertical resolution of 90 m. The elevation data are integral numbers given in meters and related to the WGS84 ellipsoid. The data are not revised and may contain artefacts such as voids, spikes, and wells (WOLF, 2006).

WOLF (2006) examined the suitability of the SRTM elevation model for the extraction of hydrogeologic parameters. In spite of an observed noise in the order of 1-3 m, he was able to show that the DEMs have a high geometric accuracy. DEMs generated by interferometric methods contain height information from buildings or vegetation (WOLF, 2006). A huge part of the incoming radiation is reflected by treetops. Such additional heights may cause mistakes during calculation of flow directions and especially during extraction of longitudinal profiles.

## 3 Methodology

## 3.1 Quantification of local Correlation between Streams and Faults

In 1981 STOYAN & STOYAN published a method to quantify correlations between geometric structures on maps. They mentioned, that it is not satisfactory to compare stereographic plots. Adjacencies must be taken into account.

Two different line systems  $A_1$  and  $A_2$  will be considered where:

 $A_1$  = drainage system

 $A_2$  = fault system

The line densities (intensities)  $\lambda_1$  and  $\lambda_2$  of these two systems are measured first:

(1) 
$$\lambda = \frac{\text{complete line length}}{\text{area of the territory}} \quad \text{in} \quad \left[\frac{1}{km}\right]$$

The reduced covariance  $C_{12}$  (STOYAN & STOYAN,1981 [38]) gives the expected total line length of  $A_2$  measured in a circle with radius r. The circle is placed at any point belonging to  $A_1$ . According to STOYAN & STOYAN (1983)  $C_{12}$  is well approximated by moving the circle at regular intervals along  $A_2$ , measuring total fault lengths inside, and calculating the mean over all measuring points.  $C_{12}$  describes the correlation between the faults and streams completely. If  $A_1$ and  $A_2$  are completely independent, then (STOYAN & STOYAN, 1981)

where  $b_r$  is a circle with radius *r*. Hence if  $C_{12}(b_r) > \lambda_2 F(b_r)$ : positive correlation ("attraction"), and if  $C_{12}(b_r) < \lambda_2 F(b_r)$ : negative correlation ("repulsion") is given. To improve clarity, a modification of  $C_{12}$  is used:

(3) 
$$G_{12}(r) = \left[\frac{\frac{d}{dr}C_{12}(r)}{2\pi r\lambda_2}\right] - 1$$

If  $G_{12}$  is positive, than positive correlation is given between  $A_1$  and  $A_2$  for the given *r*. The method of STOYAN & STOYAN (1981, 1983) is a formulation giving the tendency of rivers to flow near faults. No statement is made about the directions of the two line systems.

#### 3.2 Longitudinal profiles

#### 3.2.1 Gradient Index according to HACK (1973)

HACK (1973) defined the gradient index *SL*, which can be measured directly from longitudinal profiles. To this end single reaches of one stream must be defined. Convex or concave knickpoints separate two reaches. According to HACK (1973) every single reach should be a simple logarithmic line following the equation

The gradient index (SL) can be calculated for a single reach with:

(5) 
$$SL = \frac{\Delta H \times L}{\delta L},$$

where  $\Delta H$  is the difference in elevation between the ends of the reach,  $\Delta L$  is the stream length measured from the drainage divide to the center of the focused reach. The slope of a profile is the derivative of equation 4,

(6) 
$$\frac{dH}{dL} = kL^{-1}, \quad \text{or} \quad S = \frac{k}{L}.$$

Therefore the gradient index is equal to the constant k in equation 4. The *SL*-index allows it to compare anomalous steep or gentle reaches.

#### 3.2.2 The Stream Power Law

Recently some authors tried to extract information regarding patterns and rates of active deformation directly from longitudinal profiles. (KIRBY & WHIPPLE, 2001; LAGUE et al., 2000; WOBUS et al., 2006). All these authors used DEMs to perform their analyses. A detachment-limited incision model asks for a power-law function for the river profile evolution (KIRBY & WHIPPLE, 2001). The time rate of change of channel elevation dz/dt can be expressed as:

(7) 
$$\frac{dz}{dt} = U - E, \quad \text{or}$$

(8) 
$$\frac{dz}{dt} = U(x,t) - KA^m S^n,$$

where *U* is rock uplift rate, *E* is erosion, *A* is upstream drainage area, *S* is local channel gradient, *K* is a dimensional coefficient of erosion, and *m* and *n* are constants. Assuming steady state conditions (dz/dt = 0) equation 8 can be solved to yield an expression for equilibrium channel gradient (KIRBY & WHIPPLE, 2001).

(9) 
$$S = \left(\frac{U}{K}\right)^{\frac{1}{n}} A^{-\frac{m}{n}}, \quad \text{or}$$

$$S = k_s A^{-\theta},$$

where  $\theta$  is called intrinsic channel concavity -(m/n) and  $k_s = (U/K)^{1/n}$  gives the steepness coefficient. This predicts that the concavity index  $\theta$  is completely independent from uplift, while  $k_s$  shows a direct proportionality with U.

#### 4 Results for the Erzgebirge

#### 4.1 Correlation between Streams and Faults

The flow direction of a river at one point changes depending on the scale and age of a map. So it is necessary to fix a rivers direction at all points according to an unambiguous criterion.

STOYAN & STOYAN (1983) suggested to approximate the drainage system with a set of straight lines to eliminate small insignificant curves. The original structure and prominent curves should be maintained. Subjectiveness can not be avoided completely. STOYAN & STOYAN defined, that the distance between the original streams and the approximated straight lines are not to be larger than a given distance. To this end a 0.5 km buffer was created around the stream vectors, which has to include the new lines. A distance of 0.5 km was chosen because the



Figure 2: Subset of straightened drainage system and faults digitized from geological maps as used for further analysis; grey = streams, black =faults

drainage systems structure is conserved satisfying with this buffer. The resulting line systems are

mapped in figure 2.

The first step in calculating  $G_{12}$  is to find the line densities of both the drainage system ( $A_1$ ) and the fault system ( $A_2$ ) (figure 3). The territory has an area of 943.8 km<sup>2</sup>, so the line densities are (equation 1):

 $\lambda_1 = 0.69$ /km and

 $\lambda_2 = 0.94$ /km.

A rectangular grid was lain over the territory with a spacing of 2 km in both NS and EW direction. A set of 6 circles was defined with radii r = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8,



Figure 3:  $G_{12}$  for different *r* calculated from fault system and drainage system in figure 3. Positive correlation can be observed for radii smaller than 400m.

*1.0,* and *1.2* km. The center of the set of circles was moved to every inter-section point of the fault system and the grid. At the measuring points the line length of streams in every circle was measured.  $C_{12}$  was calculated as the mean of total line length in every circle of radius *r*. With  $\lambda_2$ , *r*, and  $C_{12}$  the coefficient of local correlation  $G_{12}$  was calculated (equation 3).

For small radii a positive correlation between the two line systems is given (figure 3).

#### 4.2 Longitudinal Profiles

HACKs gradient index (1973) is able to weight the knickpoints according to their importance and to their real steepness. Thus longitudinal profiles with different height-to-length ratios can be compared numerically. Some knickpoints mapped before may vanish because of their insignificnace.

A problem arises from the ability of channels to adjust their longitudinal profiles in other ways (e.g. with increasing sinuousity, changing channel width, or bed state as mentioned by WHIPPLE et al., 2000 and WOBUS et al., 2006). Because of this complexity the normalized steepness index must yield better results, since at least one more influencing factor (the catchment area) is concerned.

Two different kinds of knickpoints can be discriminated. For availability of equation 10 temporally constant ("adjusted") knickpoints were assumed. A drainage system may also contain knickpoints, which were caused by former, currently aborted base level change. Such points of steepening will propagate back through the system by regressive erosion, until they are completely replaced. For a single profile it is not possible to differentiate the two types of tectonically induced knickpoints. For a complete drainage system the discrimination may be possible as shown in figure 5.

Few of the knickpoints mapped for the river Zschopau and its tributaries are situated along a slightly curved line. The assumed fault in figure 6 could not be found in a geological or structural map. Nevertheless we were able to verify its existence in the field as small elongate marshes.

In 1983 BAUER mapped marshes in the Eastern Erzgebirge for the sake of finding invisible faults. He argued that the igneous and metamorphic rocks of the Erzgebirge can not contain

ground water except on faults and fractures. Hence marshes must be situated along faults. In the field we visited the knickpoints and found marshes directly adjacent to them and elongated in the direction of the assumed fault in figure 5.

A steady state system can be assumed, so that further analysis with the stream power law is useful. The regression of a slope-area plot according to equation 10 was carried out for the river Zschopau and its tibutaries. Subsequent to this the normalized steepness index was calculated and plotted in a map (figure 5). WOBUS et al., 2006 suggested to examine the data for dependency between ks and  $\theta$ . This was done for the northern tributaries of the river Eger.



Figure 4: Right hand side: Slope-area plot for one of the tribustaries of the river Zschopau. Left Hand side: Corresponding longitudinal profile. Two segments were defined in the slope area plot and regressed with equation 10 as regression model. Obtained equations can be found in the upper right corner. Upper one corresponds to the left segment.

A strong dependent relationship can be observed, so we decided to use the normalized steepness index  $k_{sn}$  as introduced by WOBUS et al., 2006.

Obviously the largest  $k_{sn}$ -indices follow the assumed fault (figure 5).

## 5 Discussion and Conclusions

In map view correlation between streams and faults can be shown. Streams tend to use faults as zones of weakness to flow on. Thus the attempt to detect faults by searching for anomalous long and straight reaches of streams is confirmed. The streams of the Erzgebirge and the Egerift differ very often from the graded profile. Nevertheless it is not easy to find causes of knickpoints. The Erzgebirge itself is strongly influenced by men. Weirs and dams are common and frequent constructions. In a 90 m-resolution DEM as SRTM a small weir will not be visible. But the positions of large dams and reservoirs must be known to prevent misinterpretations.

Different indices were used to describe the longitudinal profiles in a map. The gradient index from HACK (1973) and the steepness index derived from the stream power law were used. A normalized steepness index seems most promising. The  $k_{sn}$ -index can be used as a relative uplift rate. It can be written as

(11) 
$$k_s = \left(\frac{U}{K}\right)^{\frac{1}{n}}$$

The coefficient n is assumed to be l as suggested by WHIPPLE et al. (2000) [8] for erosion dominated by plucking. These authors mentioned, that plucking is the dominant erosive process wherever rocks are well jointed on a submeter scale. Impacts of large saltating grains produce large stresses that drive the crack propagation necessary to loosen joint blocks. During field work the dominance of this kind of erosion was found to be predominant.

The attempt was made to calculate an absolute uplift rate with the help of terraces. With a simple model neglecting sea level changes an erosion coefficient *K* of 0.09 mm/year was calculated.



Figure 5: River Zschopau and tributaries. Both transient and steady state knickpoints can be found in this catchment area (left hand side) Due to retreating erosion transient knickpoints caused by a single event (base level lowering) will be situated near a constant elevation. For steady state systems the knickpoints should be situated at different elevations but along a thought line. For the assumed fault of the steady state system an uplift rate can be calculated from the k<sub>sn</sub>-index (right hand side).

Assuming this erosion coefficient to be true for all streams flowing on similar rocks, it is possible to compute an uplift rate from the  $k_{sn}$ -index by solving equation 11 for U.

Uplift rates between 0.03 and about 1.8 mm/year for the fault in figure 5 were calculated from the  $k_{sn}$ -values and plotted in figure 5 (right hand side).

The erosion coefficient K was also used for streams crossing the Eger Rift border fault. Resulting uplift rates also fluctuated from 0.03 up to about 2 mm/year. Problems arise from the ability of channels to adjust their longitudinal profiles in other ways (e.g. with increasing sinuousity,

changing channel width, or bed state as mentioned by WHIPPLE et al., 2000 and WOBUS et al., 2006), and from differences in bedrock geology or joint spacing, and therefore from erosion coefficient.

## 6 References

- BAUER, H. Zur Methodik von Störungskartierungen in Teilbereichen des Osterzgebirges aufgrund hydrologischer und geomorphologischer Kriterien. Freiberger Forschungshefte, 390:289–309, 1983.
- HANCOCK, S.H., ANDERSON, R.S. & WHIPPLE, K.X. Beyond power: Bedrock river incision process and form. In Rivers over Rock: fluvial processes in Bedrock channels. Tinkler, K. J. and Wohl, E., 1998.
- JENSON, S.K. & DOMINGUE, J.O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54(11):1593–1600, 1988.
- KIRBY, E. & WHIPPLE, K. Quantifying differential rock uplift rates via stream profile analysis. Geology, 29(5):415–418, 2001.
- LEYDECKER, G. Erdbebenkatalog für die Bundesrepublik Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 800 2004. Datenfile, BGR Hannover.
- STOYAN, D. & STOYAN, H. Quantifizierung von Korrelationen zwischen geometrischen Strukturen auf geologischen Karten. Zeitschrift für angewandte Geologie, 28(5):240–244, 1981.
- STOYAN, D. & STOYAN, H. Über eine Methode zur Quantifizierung von Korrelationen zwischen geologischen Liniensystemen. Zeitschrift f
  ür angewandte Geologie, 29(10):512–517, 1983.
- WHIPPLE, K., HANCOCK, G. & ANDERSON, R. River incision into bedrock: Mechanics and relative efficiency of plucking, abrasion and cavitation. GSA Bulletin, 112(3):490–503, 2000.
- WOBUS, C., WHIPPLE, K.X., KIRBY, E., SNYDER, N., JOHNSON, J., SPYROPOLOU, K., CROSBY, B. & SHEEHAN, D. Tectonics from topography: Procedures, promise, and pifalls. In S.D. Willett, N. Hovius, M.T. Brandon, and D.M Fisher, editors, Tectonics, Climate, and Landscape evolution: Geological Society of America Special Paper 398, Penrose Conference Series, pages 55–74, 2006.
- WOLF, M. Untersuchung der Eignung des X-SAR/SRTM-Höhenmodells für die Ableitung hydrologisch relevanter Reliefparameter. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, 1/2006:31–39, 2006.

# Remote Sensing and GIS Approach for the Detection of Areas Prone to Natural Hazards in Northern Yucatan, Mexico

#### BARBARA THEILEN-WILLIGE & LARS MATTHES<sup>1</sup>

Abstract: The Yucatan peninsula / SE-Mexico is prone to severe natural disasters such as hurricanes and flooding. Due to its geotectonic position near active plate boundaries tsunami risk has to be taken into account as well. Especially northern Yucatan is susceptible to flooding due to its lowlands to storm surge and tsunamis. Therefore this contribution considers the use of remote sensing data for the detection of traces indicating past, catastrophic inundation events as it can be assumed that coastal areas that were hit in the past by catastrophic storm surge and tsunamis might be affected by similar events in the future again.

LANDSAT ETM and Digital Elevation Model (DEM) data derived by the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) of the Northern Yucatan area in Mexico are investigated in order to detect traces of the structural setting, karst features and of earlier flooding events. Tectonic features can be derived by the drainage pattern analysis and the identification of linear morphologic and tonal anomalies on the imageries. Traces of the Chicxulub impact crater can be clearly identified. The LANDSAT ETM imageries merged with digitally processed and enhanced SRTM data indicate areas that might be prone by flooding in case of catastrophic flooding events. This is of importance for disaster preparedness and mitigation measurements.

## 1 Introduction

The Yucatan peninsula is prone to severe natural disasters such as hurricanes and flooding. Due to its geotectonic position near active plate boundaries tsunami risk has to be taken into account, too (Fig.1). Storm surges, although not potentially as destructive as a major tsunami, are comparatively more frequent in Mexico. Especially northern Yucatan is exposed to flooding due to its coastal lowlands. The level of vulnerability of coastal communities in Yucatan for future flooding events exhibits some variations along the shoreline. Therefore, inundation maps indicating the extent of the coastal strip that would be affected by potential events of both tsunamis and storm surges have to be prepared. This contribution considers the use of remote sensing data for the detection of traces indicating past, catastrophic inundation events as it can be assumed that coastal areas that were hit in the past by catastrophic storm surge and tsunami events might be affected by similar events in the future again.

A circular cosmic impact structure, the Chic xulub crater, on northern Yucatan was discovered based on gravity and magnetic anomalies. Evid ence gathered from topographic data, geophysical data, well logs, and drill-c ore samples i ndicates that the buried Chicxulub basin is approximately up to 250 km in diameter. It is assumed that the subsurface basin continues to deepen (Hildebrand, http://miac.uqac.ca/MIAC/chicxulub.htm, POPE et al., 1993).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>, TU Berlin, Inst. f. Angew. Geowissenschaften, Hydrogeologie, Ackerstr.71-76, 13355 Berlin



Figure1 Plate boundaries and major earthquake distribution Bathymetric data: http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/ibcca/ibcca.html Seismotectonic data: http://map.ngdc.noaa.gov/website/seg/hazards\_pacific/viewer.htm

# 2 Methods

The evaluation of digital topographic data is of great importance as it contributes to the detection of the specific geomorphologic/ topographic se ttings of tsunami prone areas. LANDSAT ETM and DEM data were used as layers for genera ting a Natural Hazard GIS and combined with different geodata and other thematic maps. The support provided by remote sensing data, including DEM data acquired by Space Shuttle Mi ssions, and a GIS based spatial databases for the delineation of potential risk sites in Yucatan is investigated.

For the objectives of this study the following di gital elevation data have been evaluated: Shuttle Radar Topography Mission - SRTM, 90 m resolution) data provided by the University of Maryland, Global Land Cover Facility (http://glcfapp.umiacs. umd.edu: 8080/esdi/) were used as base maps. The digital topographic data were merged with LANDSAT ETM data (Band 8: 15 m resolution). For enhancing the LANDSAT ETM data digital image processing procedures have been carried out using ENVI 4.3.-Software. The various data sets as LANDSAT ETM data, topographic, geological and geophysical data from th e study regions were integrated as layers into GIS using the software ArcView GIS 3.3 with the extensions Spatial Analyst and 3D-Analyst and ArcGIS 9.1 of. Other geodata as provided by ESRI ArcIMS Server or USGS Natural Hazards Support System were included, so earthquake data or bathymetric maps.

Geomorphometric parameters as slope degree, minimum or maximum curvature provide information of the terrain morphology indicating geomorphologic features that might be related to flooding events.

## 3 Geomorphologic and Geologic Setting

The Yucatan peninsula is a 300 km wide carbonate platform that extends northward from Central America and includes the Mexican states of Ca mpeche, Yucatan and Quintana Roo. It is bordered to the west and north by the Gulf of Rocks along the coast are of Pleistocene and Holocene age, while older Miocene and Eocene deposits are exposed farther inland. The northern part of Yucatan comprises the typical karst morphology consisting of rolling plains that ha ve few surface streams and often no surface valleys. Caves and karst features are common in nearly all parts of the Peninsula (Back, 1992).

The landscape is characterized by sinkholes, in some areas tens or hundreds of sinkholes per square kilometre. These sinkholes range from ba rely discernible shallow swales one to two metres wide to depressions hundreds of metres in depth and one or more kilometres in width. About 65 million years ago a large asteroid or comet impacted the northwest coastline of the Yucatan Peninsula, Mexico. Somehow the crater is able to reach up through several hundred metres of sediment, and tens of millions of ye ars of time, to influence groundwater flow. Some form of subsidence controlled by peripheral struct ure of the crater may have induced fracturing in the much younger rocks that cover the crat er. The fracturing could then initiate the groundwater flow that caused the cenotes to fo run. This subsidence might be continuing. The edges of the crater correspond to a notch in the coastline in the east, and to a sharp bend southwards in the west. Also, the cenote ring co rresponds to a topographic low of up to 5 metres along much of its length (Hildebrand, http://miac.uqac.ca/MIAC/chicxulub.htm, KINSLAND et al., 2005).

Ongoing subsidence of this area is assumed by P OPE et al. (1993, 1996) which might influence future flooding susceptibility. The impact crater affects flooding susceptibility as the distribution of lower areas in NW Yucatan follows the impact related ring faults.




Figure 2 Height map of Yucatan / Mexico



Figure 3 Perspective view of the SRTM height map (same height intervals as in Fig.3) enhancing the geomorphologic traces of the Chicxulub impact crater



Figure 4 Perspective View of the height map for enhancing the structural influence on flooding susceptibility

#### 4 Areas Susceptible to Flooding

Analyzing the LANDSAT data as provided by the Global Land Cover Facility of the University of Maryland / USA and SRTM data it becomes obvious that the eastern coasts of Yucatan show traces of earlier inundations with higher flooding intensities than the western and northern coasts. It can be assumed that the western coasts of Yucatan were more prone to flooding by storm surge than by high energetic tsunami waves (T HEILEN-WILLIGE et al., 2007). This is in coincidence with field observations of W ARD & BRADY (1979) describing storm deposits in the shoreline section of Northeast Yucat an composed of material derived both from offshore and from the shoreline. Figures 5 and 6 demonstrate how SRTM derived height data can be used to visualize the potential flooding sites at the eastern coast of Yucatan. By extracting the lowest areas (areas below 15 m) from the SRTM DEM data flooding susceptible areas can be documented (Fig.5). Merging the height data with the position of settlements and streets mapped from LANDSAT imageries it becomes obvious which settlements are more susceptible of being flooded due to their height position.

21 907N

DGPF Tagungsband 16 / 2007 - Dreiländertagung SGPBF, DGPF und OVG

Figure 5 Height map showing areas up to 15 m height - susceptible to flooding



Figure 6 Infrastructure susceptible to flood waves at the eastern coastal areas of Yucatan

Another approach to get an impression of flooding prone areas is to calculate the flow accumulation based on digital elevation data (Fig.7).



Figure 7 Flow Accumulation map (left) indicating in light tones those areas with the highest flow accumulation and the corresponding LANDSAT ETM scene

The GIS implemented flow accumulation function is applied to calculate surface runoff and lateral flow toward streams using a two-compartment distributed delay function. The flow accumulation function routes the flow of water finding a flow direction for every cell of the elevation grid following the steepest paths. Flows from cell to cell on the same flowpath result in a flow accumulation map in which the value for each cell represents the accumulated flow along a particular path.

# 5 Conclusions

 Evaluations of LANDSAT ETM and SRTM data show evidence that catastrophic flooding events have happened in the past at the coasts of Yucatan. This should be considered in the emergency planning and measurements of disaster preparedness.

- The coastal areas of western and northern Yucatan seem to be prone more to storm surge than the eastern part whereas the eastern part shows more traces of high energertic flood waves.
- There is a strong evidence that subsurface structures influence flooding susceptibility as the ring structure of Chicxulub.

#### 6 References

- BACK, W., 1992: Coastal Karst formed by Groundwater Discharge, Yucatan, Mexico.-International Contributions to Hydrogeology, Vol.13, 461- 466, Verlag Heinz Heise, Hannover, FRG
- HILDEBRAND, A.: Chicxulub Crater, Mexico, and the Cretaceous Tertiary boundary.http://miac.uqac.ca/MIAC/chicxulub.htm
- KINSLAND, G.L. et al., 2005 : Topography over the Chicxulub impact crater from Shuttle Radar Topography Mission data.- Geol.Soc.of America, Special Paper 384: Large Meteorite Impacts III: 141–146
- KELLER, G., STINNESBECK, W., ADATTE, T., STUBEN, D., 2003: Multiple impacts across the Cretaceous-Tertiary boundary.- Earth-Science Reviews 62:327-363
- KELLER, G., W. STINNESBECK, T., ADATTE, B., HOLLAND, D., STUBEN, M., HARTING, C., DE LEON, J., DE LA CRUZ, 2003: Spherule deposits in Cretaceous-Tertiary boundary sediments in Belize and Guatemala.- Journal of the Geological Society, London, Vol. 160: 783-795 Kring, D.: Chicxulub Imapact Event.http://www.lpl.arizona.edu/SIC/impact\_cratering/Chicxulub/Chicx\_title.html http://www.lpl.arizona.edu/SIC/impact\_cratering/Chicxulub/Drilling\_Project.html
- NASA: PIA03379: Shaded Relief with Height as Color, Yucatan Peninsula, Mexico.http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA03379
- MORGAN, J. & WARNER, M., 1999: Chicxulub: Third dimension of a multi-ring impact basin.-Geology.Vol.27: 407-410
- PARARAS-CARAYANNIS, G., 2004: Volcanic Tsunami Generation Source Mechanisms in the Eastern Caribbian Region.- Science of Tsunami Hazards, Vol. 22, No. 2: 74-114, http://library.lanl.gov/tsunami/ts222.pdf
- POPE, K.O., OCAMPO, A.C., KINSLAND, G.L. & SMITH, R., 1996: Surface expression of the Chicxulub crater.- Geology. 1996 Jun;24(6):527-30. http://www3.imperial.ac.uk/earthscienceandengineering/research/iarc/impacts/chicxulubim pact crater/
- POPE, K.,O., OCAMPO, A.C. & DULLER, C.E., 1993: Surficial Geology of the Chicxulub impact crater in Yucatan, Mexico.- Earth, Moon and Planets, 63: 93-104
- SEELE, S., E., 1993, Geografia y Desarrollo, Vol.III No. 8-9
- SHARPTON, V.,L., 1995: Chicxulub Impact Crater Provides Clues to Earth's History.- Earth in Space Vol. 8, No. 4, December 1995, p. 7, <u>http://www.agu.org/sci\_soc/sharpton.html</u>
- THEILEN-WILLIGE, B., 1981: The Araguainha Impact Structure /Central Brazil.-Revista Bras. Geociencias, 11: 91-97, Sao Paulo/S.P., Brasilien
- THEILEN-WILLIGE, B., 1982: The Araguainha Astrobleme/ Central Brazil.- Geol.Rdsch., 71,1:318-327, Stuttgart
- THEILEN-WILLIGE, B., 1987: The Use of Airborne and Spaceborne Radar Images for the Detection and Investigation of Impact Structures.- in: POHL,J.(Ed.): Research in Terrestrial Impact Structures: 115-130,Vieweg-Verlag, Braunschweig

- THEILEN-WILLIGE, B., 2006: Remote Sensing and GIS Contribution to Tsunami Risk Sites Detection in Southern Italy, Zeitschrift PFG der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation - PFG, Heft 2: 103-114
- THEILEN-WILLIGE, B., MATTHES, L. & TRÖGER, U., 2007: Remote Sensing and GIS Contribution to Natural Hazard Assessment in Yucatan, Mexico.- PFG, 2, 2007,85-98, <u>http://www.dgpf.de/</u>
- TRÖGER, U. & THEILEN-WILLIGE, B., 2006: Nach der Flutkatastrophe ist vor der Flutkatastrophe – Die Nutzung von Fernerkundungsdaten.- TU International, "Schutz vor Katastrophen" 58: 26-27, TU Berlin, Juni 2006, http://www.tuberlin.de/foreignrelations/archiv/tui 58/troeger.pdf
- WARD, W.C. & BRADY, M.J., 1979: Strandline Sedimentation of Carbonate Grainstones, Upper Pleistocene, Yucatan, Mexico.- AAPG Bulletin, 1979, 63,3:362-369
- WOOD, J.D., 1996: The geomorphological characterisation of digital elevation models PhD Thesis, University of Leicester, UK, http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/phd

# Quantitative erosion estimation in the rugged topography of the high Himalayas. Integrated approach.

#### ANDERMANN C.<sup>1</sup>, GLOAGUEN R.<sup>2</sup> & STADLER S.<sup>3</sup>,

Abstract: Extreme and hardly accessible terrain in the high Himalayas and the adjacent middle hills make field studies on a large scale impossible. Yet, an integrative approach of several remote sensing techniques in combination with field studies provides a solid base for the understanding of environmental processes in such areas. Our presented study is carried out in the drainage basin of the Bhotekoshi River, which is draining both the Tibetan plateau and the Himalayan range until it joins Koshi River. Digital elevation models (DEMs) with 30 m resolution, derived from ASTER images and with 7.5m resolution from aerial photography allow to simulate erosive processes as well as to correct optical data with height information. From the DEMs river profiles can be extracted and analysed for gradient changes, which provides the base of a quantification of tectonic uplift. Knowing the approximate uplift rate, erosion rates can be estimated from river profiles. Using classification analysis on optical data, precise landuse mapping can be carried out. In order to validate the correctness of the results three different methods are used: maximum likelihood classification (MLC), support vector machines (SVM) and object oriented classification (OOC). This integrated approach and the comprehensive evaluation provide powerful tools to understand the erosive processes in the Himalayas.

#### 1. Introduction

Nepal and the Himalayas are among the tectonically most active areas in the world. Recent faulting and rock uplift are responsible for a rugged topography and a distinct relief. Summer monsoon, anthropogenic activities and the extremely high relief energy cause high erosion rates. In most of the areas along the Himalayan topographic front, erosion plays a crucial role in regional development.

The extreme topography is limiting the accessibility for field studies as well as conventional optical remote sensing approaches due to shadowing. Nevertheless, more advanced remote sensing techniques offer a huge potential to quantify and analyze environmental processes such as erosion, landuse and geomorphological processes in the remote area of the Himalayas.

The study area is situated as the catchment area of the Bhotekoshi River which originates about 100 km north east of Kathmandu valley and extends far into the Tibetan plateau. On its course, the Bhotekoshi River drains the Tibetan plateau until it cuts trough the Himalayan range and joins Koshi River further downstream, which again joins Ganges River. Throughout its entire course, Bhotekoshi River flows through areas of active tectonics and of highly metamorphic geology. Near the Chinese- Nepali border it passes the Main Central Thrust (MCT) and other minor thrusts.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Andermann C.: TU Bergakademie Freiberg, Institute of Geologie, Freiberg, Germany E-mail: christoff.andermanngmail.com

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Gloaguen R.: TU Bergakademie Freiberg, Institute of Geologie, Freiberg, Germany

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Stadler S.: Leibnitz Institute for Applied Geosciences, Hannover, Germany

# 2. Objectives

The integrated approach of satellite imagery and modeling of remote sensing data is a promising straightforward application to understand natural erosion process as well as human impact and to distinguish between the contribution of individual processes to the total erosion rate in a given area. The research project is summarized in Fig.1.

The rate, intensity and origin of erosion can be modeled by applying specific classification methods - such as supervised methods (e.g. maximum likelihood classification, MLC), Support Vector Machine (SVM) and object oriented classification - to optical data in order to distinguish different landuse classes. To define landuse classes and training sites, ground truth validation through on-site surveys is essential. In the present study area landuse classes were determined by field surveys. Through combining classification with erosion rates, determined from long term field observations published by MERZ (2004), quantitative erosion rates can be calculated and allocated spatially.

Furthermore, erosion rates can be modeled from Digital Elevation Models (DEM) by



Figure 1: Schematic overview of the applied integrative erosion analysis approach

determining morphological parameters of the topography. Combining vegetation and soil type indices (derived from optical data) and the physical setting (bedrock, mean annual precipitation, slope, aspect, elevation, inclination...), an estimation of potential erosion rates can be obtained be more specific. The potential erosion rate gives information about the natural occuring erosion. Comparing potential and actual erosion rates, the impact of the different factors can be

evaluated.

Since the Himalayas are formed by recent tectonic activity, the flow paths of the major rivers are dictated by the geographical orientation of the tectonic features such as faults and thrusts. In particular riverbed gradients change abruptly by passing through tectonically active areas. KIRBY et al. (2001) and WOBUS et al. (2003) have published the interrelationship of erosion and tectonic uplift concerning the steepening of river gradients, derived from along river profiles.

# 3. Methods

The integrated approach of this study requires high resolution data. For the DEM the stereo pairs (3N and 3B) of ASTER data (L1B image, 28 December 2004) and a series of aerial photographs covering about 20 by 20 km are available. In addition preprocessed SRTM (version 2) data are used.

Modeling and analysis are carried out using Geomatica 10.0 (DEM, MLC, mapping, visualization), eCgnition for object-oriented classification, Rivertool 4.0 for river profile extraction and Matlab for model calculations (SVM, river profile analysis).

#### 3.1. DEM Generation

The extreme topography is directly controlling the quality of the DEM. One DEM was developed from the two stereo bands NADIR (3N) and the BACKWARD (3B) of an ASTER image by calculating the parallax for each pixel to determine the height. Approx. 300 tie points between both images have been set (partly manually and partly automatically). The orbital information of the images was used for georeferencing. The aerial photographs are also referred to each other with tie points. Orthorectification was performed with the ASTER 3N images.

#### 3.2. Classification methods

For the analysis of optical data the channels 1-3, 4-9 and 10–14 of the ASTER image are available as well as Landsat ETM+ (8 channels). The optical data has been orthorectified as well as atmospherically corrected using a DEM from ASTER images (30 by 30 m) to remove shadow and topography effects as well as failures due to reflectance, emissivity and temperature. Both corrections are essential to obtain precise and realistic classifications. Six classes have been identified in the field and representative training sites have been mapped by GPS. The following classes were distinguished:

- Irrigated and non-irrigated terraces
- Jungle, dense shrubs and small trees
- Dense hilltop forest (mainly pine and oak)
- Roads
- High mountains, rocks boulders and cliffs
- Water

#### 3.3. River incision model

The river course and its gradient can be described at any given point by eq.1.

$$\frac{dz}{dt} = U(x,t) - KA^m S^n \qquad \text{eq. 1}$$

where dz/dt denotes the gradient of the channel steepness through time, *U* is the uplift rate, *A* the catchment area *S* is the slope and *K* the erositivity (Kirby and Whipple, 2001). Under steady-state conditions (dz/dt = 0) the expression can be converted to:

$$S = k_s A^{\theta}$$
 eq. 2

where  $k_s$  represents the steepness which equals  $(U/K)^{1/n}$ ,  $\theta$  is a concavity index for the river bed. Eq. 2 describes the power law relationship between the channel gradient and the drainage area. The steepness index  $k_s$  and the uplift rate U are directly proportional. The basic idea is to use published uplift rates (approx. 10 mm/a for the Himalayas) and to calculate the erosivity for the entire area.

#### 4. First Results and Discussion

As discussed above, the extreme terrain is limiting the quality of the DEM generation. Theoretically a model with 15 m resolution would be possible with ASTER data but artifacts, shadow (no information) and internal errors did not allow to process elevation models with higher resolution than 30 m (Fig. 2). With the aerial photograph it was possible to process elevation models with 7,5 m resolution.

First results of classification analysis (MLC and SVM) demonstrate clear differences between the six classes (Fig. 3). The spectral information of each class was derived from training sites. The computed class Water (blue) (Fig. 2) shows good agreement with field observations as all the major rivers have been classified correctly. Also the Jungle class (red) seems to be well classified. This landuse form occurres normally on the steep mountain flanks, where it is too steep for terracing. Also the widespread terraces (green) correspond with their natural distribution. Rock (brown) and Forest (dark green) cover the higher regions where farming is not possible anymore. Only the class for Roads (black) delivers obvious wrong results. Many black patches over the whole images are clearly not streets. One explanation could be that villages and highly solidified areas have been incorrectly assigned to the street class.

As expected, the river profiles of Bhotekoshi River and its tributaries show several distinct gradient changes. The changes are giving evidence for recent tectonic activity and prove that the stream power incision model can be applied in the given area. In order to give first results on total erosion rates further analysis and post processing work have still to be carried out.

The integrated and the comprehensive evaluation provide powerful tools to understand the erosive. Hence it is not only possible to prove the results for correctness, it is also possible to predict if e.g. the agricultural use is intensifying the erosion problem or if it has even a stabilizing impact on the steep mountain flanks.



Figure 2: DEM from ASTER data with 30 m resolution. Heights are ranging from 800 to 3500m above msl.



Figure 3: Maximum likelihood classification of ASTER 1, 2 and 3N bands, distinguishing 6 classes (terraces, water, jungle, roads, forest, rock).

#### 5. Literature

- KIRBY, E. & WHIPPLE, K., 2001: Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis. Geology, vol. 29 no. 5: p. 415-418.
- WOBUS, C.W., HODGES, K.V. & WHIPPLE, K.X., 2003: Has focused denudation sustained active thrusting at the Himalayan topographic front? Geology, vol. **31** no. 10: p. 861-864.
- MERZ, J., 2004: Water Balances, Floods and Sediment Transport in the Hindu Kush-Himalayas. PhD thesis, Institute of Geography, University of Berne, Switzerland, p. 201-224.

# Calculating Channel Concavity from ASTER DEM: Case Study, Southeastern Tibet

# LU PING<sup>1</sup>, R. GLOAGUEN<sup>2</sup>, G. GOVERS<sup>3</sup> & M. CRAWFORD<sup>4</sup>

Abstract: Channel concavity contains deep meanings in studying tectonic geomorphology. It is not only related to rates and patterns of active deformation, but also indicates relationship among relief, elevation and denudation rate. Based on the stream power law, we can derive channel concavity from the relationship between slope and drainage area. We apply this technique to southeastern Tibet and calculate the bedrock channel concavity of Puqu Fault from high resolution (20 meters) DEM generated from ASTER data. The result reveals high concavity tendency in the Puqu Fault Region of southeastern Tibet.

#### 1 Introduction

The principal goal of tectonic geomorphology is to extract tectonic information from landscape topography. The concavity, often underestimated by geoscientists, however, plays a great role in extracting information concerning the rates and patterns of active deformation and uplift (KIRBY & WHIPPLE, 2001). Any spatial variation in erosion and uplift will strongly influence channel concavity (SKLAR & DIETRICH, 1998). As a result, we can extract spatially variable rock-uplift rate, channel incision rate and surface deformation rate directly from concavity.

Concavity, like other stream parameters, can be directly calculated from Digital Elevation Model (DEM). ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) data is a good choice for generating DEM. It provides the stereo image pairs in Band 3 from both nadir and backward looking. In addition, the cloud-free images are always available. Still, it provides the possibility to generate high resolution DEM such as 15 meters. In this contribution we generate 20 meters resolution DEM in order to reduce the effect of speckles in the image. We then utilize the 20 meters resolution DEM to calculate the stream concavity along the Puqu Fault in southeastern Tibet.

# 2 Study Area

In south Tibet, a mixture of normal and strike-slip faulting has been described to characterize the active tectonics of this region. The representative one of strike-slip system is Karakoram-Jiali Fault Zone (KJFZ) which consists of a set of NW-SE aligned, right-lateral faults. In the east,

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Lu Ping: Faculty of Bioscience Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Kasteelpark Arenberg 20, 3001 Leuven (Heverlee), Belgium;

Remote Sensing Group, Institute of Geology, TU Bergakademie Freiberg, 09599 Freiberg, Germany

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> R. Gloaguen: Institute of Geology, TU Bergakademie Freiberg, 09599 Freiberg, Germany

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> G. Govers: cPhysical and Regional Geography Section, Katholieke Universiteit Leuven, 3001 Leuven (Heverlee), Belgium

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> M. Crawford: Laboratory for Applications of Remote Sensing, Purdue University, West Lafayette, 47907 Indiana, USA

KJFZ is primarily bounded by Jiali Fault Zone (Fig 1) (HAO-YANG LEE et al., 2003). The movement of Jiali Fault is not only tightly related to the clockwise rotation and extruded body of eastern Tibet, but also strongly correlated to the northeastward indentation of India plate (CHUNG, L. et al., 2006).



Figure 1: Topography and principal active faults in Tibet and adjacent regions. White arrows indicate the present motions of India and northern Tibet as clockwise rotation followed by southward extrusion. The map is from (HAO-YANG LEE et al., 2003).

Puqu Fault, as the south one of two easternmost branches of renowned Jiali Fault, likewise, is influenced by eastward extrusion of north Tibet as well as clockwise rotation followed by southward extrusion. As a result, the Puqu Fault is bounded by principal dynamic zones and the surface uplift behaves very active and variable along the fault.

# 3 Methodology

The whole methodology includes three procedures, namely DEM generation from ASTER, river network extraction and calculation of concavity.

#### 3.1 DEM Generation

We have collected 187 tie points from both nadir image and backward image in Band 3 of ASTER data so as to create epipolar pairs of image. The total RMSX is 0.53 and RMSY is 0.19. The DEM was generated at 20 meters resolution with the highest possible level of detail. The holes were filled by interpolation. The overall quality of DEM is outstanding and the relief map was then created (Fig 2). Although GCPs are not available during the generation, however, the developed map of Puqu Fault demonstrates the high quality of DEM and the potential for more detailed image interpretation.



Fig 2: Shaded relief map generated from DEM with the sun position as 135 degrees compass angle and 40 degrees zenith angle. White color represents the peak of the mountain. Red arrow points at the big curve of Puqu Fault.

#### 3.2 River Network Extraction

The well-known D8 algorithm is the most commonly used method for approximating flow directions on a topographic surface, and this method tracks "flow" from each pixel to one of its eight neighbour pixels. In order to create a D8 flow grid, we first create a depressionless DEM from generated original DEM. We applied "imposed gradients" method to resolve flow direction in flats (Flats are pixels that do not have a neighbour pixel with a lower elevation). This method focus on centering flow within flat valleys and reducing parallel flow. Moreover, we format D8 flow grid from raster to vector. All pixels that have a flow code of zero are treated as basin outlets, which includes the four edges of the DEM and the nodata pixels in the DEM. The derived vector file stores data for a single basin or many disjoint subbasins. Every pixel in a particular basin is the outlet pixel for a subbasin that is contained in this basin. Each of these subbasins has many attributes, such as contributing area and relief. This vector file stores all of these attributes (in a compact way) for all of the pixels/subbasins in a given basin. Finally, in order to display the river network, we created two more vector files in Rivertools 2.4. One is the link file that stores attributes for every channel link in the river network, and the other is a streamfile that stores attributes for every Horton-Strahler stream in the river network. Moreover, in order to further calculate concavity, here we create drainage area grid as well. The drainage area is returned as numbers of pixels and square kilometres.

#### 3.3 Calculation of Concavity

The calculation is based on the stream power model that detachment-limited incision into bedrock is often modeled as a power law function of contributing drainage area and channel gradient (HOWARD & KERBY, 1983; KIRBY & WHIPPLE, 2001):

$$dz/dt = U(x,t) - KA^m S^n$$
 Eq. 1

Here dz/dt is the time rate of change of channel elevation, U is rock uplift rate relative to a fixed base level, A is upstream drainage area, S is local channel gradient, K is a dimensional coefficient of erosion, and m and n are positive constants related to basin hydrology, hydraulic geometry, and erosion process. Under steady-state conditions (dz/dt = 0), with uniform U and K and constant m and n, equation (1) can be solved to yield an expression for equilibrium channel gradient:

$$S = (U/K)^{1/n} A^{-(m/n)}$$
 Eq. 2

Equation 2 predicts a power-law relationship between channel gradient and drainage area often observed in natural landscapes, of the form:

$$S = k_c A^{-\theta}$$
 Eq. 3

Where the coefficient  $(U/K)^{1/n}$  sets the channel steepness,  $k_s$  and the ratio m/n is the intrinsic channel concavity, which equals the actual concavity  $\theta$  under conditions of uniform K, U, m, and n. When we take log in both sides of the equation 3, we get:

$$\log S = -\theta \log A + \log k_s \qquad \text{Eq. 4}$$

This means we can get concavity  $\theta$  and steepness  $k_s$  value by regression in log plot of drainage area and slope. The slope of the regression is  $-\theta$  and the intercept is log  $k_s$  (Fig 3).



Fig 3: Drainage area and slope plot in log space. We are able to calculate concavity from the regression of log plot because the slope of the regression is  $-\theta$  and the intercept is logK<sub>s</sub>. The inner figure shows the stream channel profile with elevation and distance. The black arrows indicate the data range in area and slope plot.

#### 4 Results

We have analyzed totally 49 streams and 31 of them are detected with both lower and high segments downward area/slope trend like Fig 3. Among these 31 streams, 18 of them are located west of fault and 13 are east of fault. The result of average value of concavity is showed in Table 1.

	West of Fault	East of Fault
Upper Segment		
North of Bend	0.36 (n=10)	0.82 (n=11)
South of Bend	2.78 (n=8)	2.59 (n=3)
Lower Segment		
North of Bend	1.58 (n=17)	2.20 (n=15)
South of Bend	6.56 (n=10)	6.20 (n=7)

Table 1: The result of average concavity in Puqu Fault region (n is the value of stream numbers).

The results of concavity reveal that the lowers segments of streams along Puqu Fault contain higher concavity than upper segment. In addition, to the south of typical bend of Puqu Fault (Fig 2), the concavity values in both sides of the fault are higher than north of the bend. Still, the concavity in the whole area is noticeably high: most of the stream concavity are higher than 1.5 and in the south of the bend the value can reach highly to average 6.56. Compared to other areas such as Siwalik Hills in central Nepal around 0.6 (K IRBY & WHIPLE, 2001; WOBUS et al. 2006) and San Gabriel Mountains in California of 0.45 (S NYDER et al., 2000; W OBUS et al. 2006), our result is significantly higher. Howe ver, the concavity values are similar as Red River Region in Yunnan Province of China next to the southeas to the similar landscape topography, surface deformation and uplift condition for these two areas.

# 5 Conclusion

ASTER data has high potential in calculating stream channel parameters because the stereo pairs of Band 3 provide access to generate high re solution DEM. Among these parameters, concavity, as the indicator of tectonic information, can also be calculated based on stream power law. In the case of Puqu Fault in southeaster n Tibet, the high concavity value corresponds to dramatic activities in the region: not only the extensive tectonics activity, but also the active surface deformation and erosions.

# 6 References

- CHUNG, L., YANG, T.F., CHUNG, S., LIU, T., WALIA, M. & LO, C., 2006: Fission track ages as evidence for the thermal history of jiali fault (eastern Tibet) and its tectonic implications, American Geophysical Union
- HOWARD, A. & KERBY, G., 1983: Channel changes in badlands. Geological Society of America Bulletin, 94: 739–752.
- KIRBY, E. & WHIPPLE, K., 2001: Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis. Geological Society of America, 29 (5): 415-418

- LEE, H.-Y., CHUNG, S.-L., WANG, J.-R., WEN, D.J., LO, C.-H., YANG, T.F., ZHANG, Y., XIE, Y., LEE, T.-Y. & WU, G., 2003: Miocene jiali faulting and its implications for tibetan tectonic evolution. Earth and Planetary Science Letters, 205: 185–194.
- SCHOENBOHM, L.M., WHIPPLE, K.X., BURCHFIEL, B.C. & CHEN, L., 2004: Geomorphic constraints on surface uplift, exhumation, and plateau growth in the Red River region, Yunnan Province, China. GSA Bulletin, 116: 895-909
- SKLAR, L & DIETRICH, W.E., 1998: River longitudinal profiles and bedrock incision models: Stream power and the influence of sediment supply. Geophysical Union Geophysical Monograph, 107: 237-260
- SNYDER, N.P., WHIPPLE, K.X., TUCKER, G.E. & MERRITTS, D.J., 2000: Landscape response to tectonic forcing: Digital elevation model analysis of stream profiles in the Mendocino triple junction region, northern California. American Geophysical Union, **112** (8): 1250-1263
- WOBUS, C., WHIPPLE, K.X., KIRBY, E., SNYDER, N., JOHNSON, J., SPYROPOLOU, K., CROSBY, B. & SHEEHAN, D., 2006: Tectonics from topography: Procedures, promise, and pitfalls. Geological Society of America Special Paper.

# Fault generation and development in the oblique-rifting Reykjanes Peninsula system resolved by a DEM analysis approach

#### HELBIG, M., BUCHWITZ, M., GLOAGUEN, R.<sup>1</sup> & BEKELE ABEBE<sup>2</sup>

# 1 Subject

Oblique rifting systems such as the northern Main Ethiopian Rift (nMER) or the Reykjanes Peninsula system (RPS) are spreading along a dir ection not perpendicular to the rift axis. The produced tectonic structures are very conspicuous since (1) crus tal deformation mainly occurs within en-échelon zones being both magmatically and tectonically active and (2) the fract ured surface exhibits atypical fault profiles with hanging walls tilted off the fault face and monoclinal bending coeval to fracture formation. It is yet not clearly understood how fault growth evolves and how the interaction of volcanism and faulting in fluences the surface patterns. We use remote sensing tools in order to recognize the spatial distribution of deformation within an investigation area of 20 km in width and length. High-resolu tion DEMs generated from remote sensing stereo pairs allow a quantitative analysis of the mor phologies of normal fault and monocline systems. The distribution of cumulative displacement is derived by applying simple mathematical algorithms to the DEM: (1) gradient filtering and (2) summation of vertical offset amounts. Enhancing the morphological effects of fault overlapping and interaction, the cumulative displacement distribution enables one to detect zones where deformation is concentrated.

#### 2 Area of interest

The Reykjanes Peninsula is situated in SW Iceland (Figure 2), close to Reykjavik. It offers the only on-shore outcrop of an active oblique spreading zone of the Mid-Atlantic Ridge and thus represents an excellent natural laboratory to investigate the structural geometries and the evolution of oblique rift zones. The Reykjanes Peninsula is characterised by dinstinct regions of seismic activity along the current spreading axis and by discrete en-échelon fracture zones being volcanically very active whereas periods of high seismicity and dormant volcanism are alternating with periods of strong volcanism and low seismicity. In fact, understanding of the interaction of volcanism and seismicity is very important for hazard assessment of earthquakes and volcanic eruptions for this area. Moreover, studies may be helpful for drawing analogies to other oblique rift zones.

 <sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Remote Sensing Group TU Bergakademie Freiberg, Bernhard-von-Cotta-str. 2, 09596 Freiberg, Germany, maria.helbig@student.tu-freiberg.de
<sup>2</sup> Departement of Geology and Geophysics, University of Addis Ababa, P.O. Box 1176, Addis Ababa

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Departement of Geology and Geophysics, University of Addis Ababa, P.O. Box 1176, Addis Ababa Ethiopia



Figure 2: Elevation model of Iceland. The dashed lines represent the main rift axes. The rift system splits up into two branches whereas on the Reykjanes Peninsula one branch is bended and highly oblique (30°) to the spreading direction (Hreinsdóttir & Einarsson 2001, Clifton & Schlische 2003). The investigation area (red box) lies in the SW of the peninsula.

# 3 Methodology

#### 3.1 DEM generation

High-resolution DEMs can be generated from air photographs. Overlapping pairs where processed in oder to produce epipolar images from which single DEMs for each overlapping pair are created. The horizontal resolution of these DEMs reaches up to 80 cm. The principle of this procedure is shown in Figure 1. At regular intervals (B - distance between recording time 1 and 2), a photo camera (with a lense with a focal le recording the surface by overflying the area. The point is recorded from two different points of represented by the projected distance P a on a reference plane (e.g. ellipsoid). The surface elevation h, of this point can be decribed by:

 $P_{a}/f = B/(H-h_{a}).$ 

The elevation of each point of a stereo pair is

 $h_a = B \cdot f/(P_a + H).$ 





#### 3.2 Image Processing

Figure 2a shows a section of an air-photograph-based DEM (80 cm resolution), displaying the Reykjanes area in the SW part of the peninsula. Digitizing of major faults (green) is useful for approximating the main structural trend, using the x/y position of successive node points along a fault line for calculating local strike directions:

strike [° from N] = 90°-  $\arctan((y-y)/(x-x))$ .

Fig. 2b shows the result of two image processing steps by applying two oblique (perpendicular to the fault strike) kernel functions to the DEM. The gradient filter calculates the slope of the DEM. The cumulative vertical displacement is derived by the summation of the gradient filtered image. The black arrow points to the fault system displayed in Fig. 3. In order to show the along-fault development we plotted local strike direction of the digitized fault against the cumulative vertical displacement (see Fig. 3). The plot of the cumulative displacement against fault length from digitalized fault lines are used to recognize segmentation patterns. Since initial segments of a fault accumulate vertical displacement in the initial segments is potentially higher. Thus, the correlation of cumulative displacement with the main fault strike is indicative for either left or right stepping of former separated fault segments. This is crucial for oblique-spreading rift zones, since stepping patterns determine the shear sense of oblique-slip displacement.



Figure 2a and 2b: Image processing steps. 2a: DEM of the Reykjanes area with digitized faults (green). 2b: Image of the distribution of the cumulative vertical displacement in the investigation area (blue=high, white=low, red=high).



Figure 3: Residual correlation between cumulative vertical displacement and local strike direction in a fault system marked by the black arrow in Fig. 2b. The positive correlation indicates left-stepping of former separate segments with opening directions of over 130° (SE).

# 4 Conclusion

High-resolution air photograph based DEMs not only allow a qualitative analysis of fault patterns in oblique-rift settings but can also be interpreted quantitatively: Along-fault change of fault parameters are indicative for the initial segmentation, patterns of segment joining and the direction of extension. The minimum vertical offsets required for analysis are a limitation of the method.

#### 5 References

- CLIFTON, A. E. & SCHLISCHE, R. W., 2003: Fracture populations on the Reykjanes Peninsula, Iceland: Comparison with experimental clay models of oblique rifting. Journal of Geophysical Research B: Solid Earth, 108: ETG 4–1–4–17.
- HREINSDOTTIR, S., EINARSSON, P. & SIGMUNDSSON, F., 2001: Crustal deformation at the oblique spreading Reykjanes Peninsula, SW Iceland: GPS measurements from 1993 to 1998. Journal of Geophysical Research B: Solid Earth, 106 (B7): 13803-13816.

# OPERATIONAL ASPECTS OF DIGITAL AERIAL MAPPING CAMERAS

#### **GERHARD LAUENROTH**

Abstracts: With the introduction of the new aerial digital mapping cameras, the operational aspects for aerial photo flight projects will change. New task, like digital image data handling and data copy in the field, will be implemented into the workflow. Instead of a film, digital data will be shipped and archived. The camera operators and the crew have to get familiar with the new work steps. The Z/I Imaging DMC Digital Mapping Camera System is used as an example to explain the benefits of a digital photoflight process.

#### **1 Flight Planning**

Usually the photo flight starts with the mission planning. A digital mapping camera thinks in ground samples distance (GSD) or ground resolution and not in photo scale. The flying height, the focal length and the pixel size of the CCD sensors are the parameters used for the calculation. For frame based cameras like the DMC, side overlap and forward overlap for stereo coverage basically follow the same rules as for film cameras.

The new Z/I Mission Planning software is a modern tool for photo flight mission planning. Raster backdrops can be displayed to support the users, DTM's can be used for correct overlap calculation and quality control. GeoMedia core technology enables not to use the project data during the whole photogrammetric process. The Z/I Mission software is a stand alone product, but it is also part of the DMC system. It is a full solution and does not require any other CAD software.

#### 2 Camera operation

The camera operation of a frame based digital camera like the DMC is very similar to the operation of an analog camera. The film magazine is replaced by a ruggadized mass storage unit, which can be, in case of the DMC, exchanged in the air during the flight to extend the capacity, like swapping film rolls. Alternatively, the user can choose between hard disk-based Flight Data Storage units (FDS) with a big storage volume of 4400 images, or easy to handle Solid State Devices (SSD) with 1000 images capacity which can be easily exchanged like a film magazine. A new generation of flight management systems like the Z/I InFlight Airborne Sensor Management System controls the camera system and provides information for the pilot on a display in the cockpit. A big advantage is that the camera operator can have access to the acquired image data between the flight lines or during the flight back from the mission to the air field. This is a huge benefit against film cameras because it allows a real time image quality assessment. But this is only true for frame sensor based cameras not for push broom or CCD line sensors based cameras.

INTERGRAPH GMBH, Ulmer Straße 124, D - 73431 Aalen

To maintain the quality for a photo flight, information about cloud coverage is very important. Therefore the Z/I Mission Airborne Sensor Management System has an integrated video camera which displays the image scene during the time the exposure is taken. A video thumbnail pertains to each exposure, the thumbnails can be mosaicked to an overview to get an impression of the complete mission. The camera operator can then easily identify each exposure where the cloud coverage was to much and mark these images for a second shot.

# **3 DMC DIGITAL MAPPING CAMERA**

The Digital Mapping Camera DMC is a frame based large format aerial camera, designed for high precision large scale engineering application as well as for small scale mapping projects. The DMC uses CCD frame sensors with a 12 micron pixel size, which means 144 square micron of light sensitive area.

It is the nature of a CCD that the light sensitivity increases straight linear with the light sensitive area, which means that a 12 micron CCD is approx 3.5 times more sensitive comparing to a 6.5 micron CCD – the typical format of a line sensor pixel. In connection with the much longer exposure time possible, the frame sensor has an up to 50 times higher sensitivity resp. better signal-to-noise ratio than a line sensor. This enables you to fly under worse light conditions or with lower sun angles and still fulfill the quality requirements of the mapping standards.

Because of its multi sensor multi spectral design the camera also fits perfectly for remote sensing application, like forestry analysis or agriculture monitoring.

Forward motion compensation FMC is used for aerial film cameras to improve the image quality and to avoid image blurring. The DMC has an implemented electronic FMC, which is a huge advantage and not possible with CCD line sensors. For large scale mapping project or for photo flights with long exposure time (weak light conditions) a FMC is a perquisite.

The DMC is a wide angle camera with a focal length and a field of view similar to a RMK TOP 15 film camera. The final image size of the DMC is 13824 x 7680 pixels. The footprint of this image has nearly the same width of a film based aerial image (across track) and approx 60% of the length (along track, in flight direction). Thus, the number of flight lines will remain the same comparing to a film camera, and so the flying costs.

# 4 DATA STORAGE

The DMC camera system up to now is using FDS (Flight Data Storage) units. Three units are required for a system; each FDS can store 600 GB of data, which means in total 1800 GB, equivalent to 4400 aerial images. They will be installed in the aircraft with a base plate, usually mounted to the seat rails of the aircraft.

The FDS can be installed and removed without disconnecting cables and without using any tools. If multiple FDS's are available, an exchange will be possible in the air during the photo flight to extend the storage capacity.

Starting from now, there will be two more storage alternatives available: A camera configuration with only two FDS units storing up to 3000 images which reduces volume, weight and power consumption of the system, and a internal slot for a solid state storage cartridge with 1000 images capacity. This last configuration has an extremely small form factor and a small power consumption. With these features it easily fits in small 1-engine-aircrafts.

FDS as well as SSD's are flexible and versatile data storage systems, designed for airborne operation. They can be operated up to 8000 m or 26000 ft flying altitude in a non-pressurized aircraft. Both are extremely robust and shock proofed, data safeness is absolutely assured.

For image data post processing, the FDS can be connected directly to a workstation in the office via a standard fiber channel interface; the SSD's are delivered with a download adapter as interface to the workstation or a copy station computer.

# **5 DATA HANDLING IN THE FIELD**

After an aerial photo flight mission is completed, the crew has to carry the data to the PPS station. Very often the airplane is on an "outbound mission" where the crew does not have access to the ground based post processing facility or the airplane has to get ready for the next mission as soon as possible. To save the data in this case, Z/I Imaging had developed a mobile field data copy station to copy from the onboard mass storage device to a removable media like hard disks, USB disk drives or tape drives. The user can do this either in the aircraft, in an office or hangar at the airfield or in a hotel room. A full set of FDS can be copied in less than 4 hours to removable IDE disk drives. After the copy process, the media (e.g. removable hard disk drives) will be shipped to the home office like an undeveloped film.

The copy station can also be used as a utility for on-site image quality inspection. Software tools are provided to perform a quick view of the acquired images. The radiometric image quality can be evaluated immediately. This is a benefit against the film based camera, because the user gets an immediate feedback on the success of the mission.

# 6 DATA POST PROCESSING

Frame sensor based cameras have a straight forward way for the image data post processing by using standard photogrammetric algorithms. Because of the stable X-Y sensor geometry, GPS/IMU data are not required to create the final output image. The post processing time is much shorter comparing to line sensor cameras. The software is running on standard workstations and is not requiring any special computer infrastructure.

With a minimum level of user interaction the software automatically post processes the raw image data into the final frame. The output format can be specified, multiple formats like RGB and CIR can be created in parallel. It is possible to get high resolution color imagery or color infrared images within 24 hours after the photo flight.

With an 2-processor-server equipment, the post processing time is about 2 minutes per image. For higher throughput requirements, Intergraph provides a TerraShare-based "distributed processing" solution which enables the incorporation of several processors in the network into the process. With 5 such "nodes" used, you achieve a processing time of 20 sec per image (!).

# 7 Results

The photogrammetrical results using DMC imagery are impressive. All tests show that the accuracy of an automatic aerial triangulation as well as the automatic DTM calculation are twice as good as the results achieved with scanned analog images. The RMS of a aerial triangulation has a dimension of 15% of the pixel size, and the mean error of an automatically generated DTM measured against independent control points is better than 75% of the pixel size (i.e. with images flown at an altitude of 1500m the mean error of the DTM is smaller than 10 cm!).

# 8 COST COMPARISON

If the costs for a photo flight with an analog and a digital camera are compared, it will turn out that the user can save money with the new digital technology. There are no costs for consumable material, like film and film chemistry. A statistic analysis of 4 aerial projects flown in the US, Asia and Europe (figures based on customer information) has shown that the costs for film and film development are between 16 and 20% of the total project costs.

Because of the 100% digital workflow, hardcopies and contact prints can be generated directly on high performance laser plotters, which is also a cost reduction comparing to analog copies. The costs for contact prints are between 13 and 19% of the total project costs. A direct digital print is approx. 50% cheaper with the same quality.

Project	1	2	3	4
Area	City, Germany	County, Germany	City, Asia	State, US ( DOQQ )
Area size [km <sup>2</sup> ]	890	12,000	230	
Photo scale, overlap	1:5,000 ; 60/30	1:13,000 ; 60/30	1:2,500 ; 60/30	1:40,000, pin-point
Runs, line [km]	50;1,400	60;6,300	59;900	150; 45,000
Number of images	3,600	3,000	3,850	12,000
Flying time [h], speed [kn]	13.5;140	36;160	12;140	230;180
Film type	Agfa X 100	Kodak SO359	Agfa X 100	Kodak Panatomic
Total project costs [\$ US]	104,000	113,000	102,000	440,000
Savings by a DMC [%] *	79.5	65.5	81.5	56.5
Savings by a DMC [\$ US]*	82,680	74,015	83,130	248,600

The costs for film scanning are between 34 and 52 % of the total project costs.

\* cost for a digital hardcopy approx. 50% of an analog hardcopy

Tab. 1: aerial photo flight project dates

Table 1 shows the huge cost saving potential of a digital mapping camera. For these examples, the calculation of the savings are based on the Z/I Imaging DMC Digital Mapping Camera.

# **9 REFERENCES**

- HINZ, A. (1999). The Z/I Imaging Digital Aerial Camera System, Photogrammetric Week 1999, Eds D. Fritsch / R. Spiller, Wichmann, Heidelberg pp 109 – 115
- HEIER H., DÖRSTEL C. & HINZ A. (2001). DMC The Digital Sensor technology of Z/I Imaging, Photogrammetric Week 2001, Eds D. Fritsch / R. Spiller, Wichmann, Heidelberg pp 93 – 103
- NEUMANN, K. (2003) Aerial Mapping Cameras digital versus film The benefits of a new technology . Proceeding from the ASPRS 2003 conference, May 5 –9, 2003

# Bestimmung des photogrammetrischen Genauigkeitspotentials des Online-Systems ANTAR zur luftgestützten Verkehrsdatenerfassung

#### **GÖRRES GRENZDÖRFFER & SERGEY ZUEV<sup>1</sup>**

Zusammenfassung: Photogrammetrische Systeme mit GPS/INS stoßen immer mehr in Online-Anwendungen vor. Allerdings liegen die erzielten Genauigkeiten im Objektraum aus verschiedenen Gründen deutlich unter den theoretischen Möglichkeiten. In dem Beitrag werden verschiedenste Einzelfaktoren identifiziert und deren Einfluss im Rahmen von Testflügen systematisch analysiert. Durch eine konsequente Kalibrierung kann für das ANTAR-System eine deutliche Genauigkeitssteigerung erzielt werden.

# 1 Einleitung

Das DLR mit den Einrichtungen Verkehrsstudien, Optische Informationssysteme und dem Institut für Verkehrsforschung hat in den letzten Jahren ein Online-System zur großflächigen, detaillierten und differenzierten Erhebung von Verkehrsdaten aus der Luft entwickelt, dass unter anderem im Rahmen der Fußball WM 2006 in Deutschland sehr erfolgreich eingesetzt wurde. Das Modul zur Verkehrsdatenerfassung besteht aus dem Kamerasystem ANTAR (Airborne Traffic Analyser) und der Auswertesoftware Traffic Finder für die automatisierte, echtzeitnahe Verkehrsdaten-Extraktion am Boden. Das ANTAR-System beinhaltet eine optische und eine Wärmebildkamera, sowie ein hochgenaues GPS/INS (Applanix 410) zur Online-Orientierung. Die Auswertesoftware Traffic Finder analysiert die eingehenden Bilder online und bestimmt die straßenbezogenen Verkehrsparameter (RUHE et al, 2007). Bei der bisherigen Online-Prozessierung der ANTAR-Daten einer Dalsa 1M28 Kamera wird die äußere Orientierung durch das GPS-INS bestimmt. Die innere Orientierung der Kamera war ursprünglich weitgehend unbekannt. Bei der Online-Georeferenzierung werden einige Annahmen zur Vereinfachung der Prozessierung getroffen:

- Es wird von einer ebenen Bezugsfläche ausgegangen. Geländeunterschiede im Bild werden nicht berücksichtigt. D.h. es wird keine Orthorektifizierung durchgeführt. Das ist bei der Aufnahme von Straßen und insbesondere Autobahnen auch eine zulässige Vereinfachung.
- 2. Die Mittlere Geländehöhe wird aus dem SRTM-Geländemodell abgegriffen. Die Höhengenauigkeit des SRTM-Geländemodells von mehreren Metern führt ebenfalls zu signifikanten Lagefehlern im Objektraum. Auch hier fällt der Fehler in der Praxis nicht weiter auf, da die relative Genauigkeit zwischen benachbarten Bildern im Vordergrund steht.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Dr.-Ing. G. Grenzdörffer, Universität Rostock, Institut für Management ländlicher Räume, J.-v.-Liebig Weg 6, 18059 Rostock, email: goerres.grenzdoerffer@uni-rostock.de

Dr.-Ing. S. Zuev, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Optische Informationssysteme, Rutherford Str.2, 12489 Berlin-Adlershof, email: sergey.zuev@dlr.de

Diese ist hoch solange der Fehler des DGM's bei benachbarten Bildern ähnlich ist. Zudem verringert die hohe Bildfrequenz ebenfalls den Fehler.

Die theoretische Lagegenauigkeit der GPS-INS Lösung bei der Online Prozessierung liegt bei einer Flughöhe von 500 m über Grund bei 0.13 - 0.43 m. Im Postprozessing liegt, bei einer Flughöhe von 500 m, der theoretische Erwartungswert des ANTAR-Systems bei 0.07 - 0.13 m, d.h. deutlich im Subpixel-Bereich. Im Rahmen des Beitrags wird das tatsächlich erreichbare Genauigkeitspotential des ANTAR-Systems anhand von zwei Testflügen indirekt bestimmt und auf die einzelnen Einflussfaktoren (innere und äußere Orientierung, Leverarm, Boresitewinkel, DGM, Bildqualität (JPG-Komprimierung), detailliert eingegangen. Da die technischen Möglichkeiten und die Bedürfnisse für hochgenaue Online-Anwendungen, z.B. im Katastrophenschutz, Verkehrsüberwachung o.ä. stark steigen, ist eine systematische Auseinandersetzung über das erreichbare Online-Genauigkeitspotential und deren Einflussfaktoren von großer Bedeutung.

# 2 Problemstellung

Die Online-Genauigkeit eines des ANTAR-Systems wird durch viele Einflussfaktoren bestimmt. In der nachfolgenden Tabelle sind die wichtigsten Faktoren aufgelistet und kurz beschrieben.

Fehlerquelle	Problem	Korrekturmöglichkeit durch Kalib- rierung	Einfluss auf Sys- temgenauigkeit*			
Innere Orientierur	Innere Orientierung					
Bildhauptpunkt	Lage unbekannt	Gegeben, Voraussetzungen: gegen- läufig aufgenommene Streifen, opti- mal zusätzliche Querstreifen	Systematischer Feh- ler, > 2 m (macht sich innerhalb eines Streifens nicht be- merkbar)			
Brennweite	Circa Wert bekannt	Gegeben, Voraussetzungen: Hohe Reliefunterschiede im Untersu- chungsgebiet oder verschiedene Flughöhen, Passpunkte; Optimal ge- naue Kenntnis der Lage der Projekti- onszentren.	Systematischer Feh- ler, > 2m (macht sich innerhalb eines Strei- fens gering bemerk- bar, nimmt zum Bild- rand hin zu)			
Radialver- zeichnung	Umfang unbekannt	Gegeben, Voraussetzungen: Kon- vergierende Aufnahmen, Passpunk- te. Kann in Rahmen einer AT nur bedingt geschätzt werden.	Systematischer Feh- ler, der sich zum Rand hin stärker bemerkbar macht			
Äußere Orientierung						
Zeitsynchronisa- tion zw. GPS/ INS und Frame grabber / Kamera	Der GPS/INS Zeit- stempel stimmt nicht mit Auslöse- zeitpunkt überein	Nicht möglich	unsystematischer Fehler, der die Kalib- rierung der Kamera erschwert			
GPS/INS – Onli- ne vs. Postpro- zessing	Genauigkeitssteige- rung durch Postpro- zessing	Gegeben durch GPS-Postprozessing mit hochgenauen Korrekturdaten	Mittel (< 1 m)			

Leverarm	Schätzwert, Syste- matische Fehler durch Messung und unsystematische Fehler durch Vibra- tionen	Gegeben, Voraussetzung: Vergleich mit indirekter Bestimmung der Orien- tierung, Schwierigkeit: Trennung von systematischem und unsystemati- schem Anteil. Problem: Fehler in der inneren Orientierung wirken sich auf die Bestimmung des Leverarms aus.	Gering (5 – 20 cm)	
Boresite-Winkel	Unbekannt, Syste- matischer Fehler	Gegeben: Voraussetzung Vergleich mit indirekter Bestimmung der Orien- tierungselemente. Problem: Fehler in der inneren Orientierung wirken sich auf die Bestimmung der Boresite- Winkel aus.	Mittel - Groß (< 2.5 m und 0.3°)	
Externe Faktoren				
DGM	Unsystematischer Fehler, der sich in Abhängigkeit der Radialentfernung bemerkbar macht.	Nicht gegeben: da externer Fehler, Verbesserung durch Verwendung eines genaueren DGM's bzw. Ortho- rektifizierung	> 5 m	
JPG- Komprimierung	Verringerung der Bildqualität, bzw. Problem bei auto- matischer Verknüp- fungspunktsuche	Nicht gegeben: kann aber durch die Erhöhung der Bandbreite bzw. Ein- satz neuer Funktechnik verringert werden	> 0.5 m	

\* Annahmen: Flug ANTAR-System in 500 m Höhe

Fazit: Der Erwartungswert für die Lagegenauigkeit der Online-Lösung des ANTAR-Systems liegt bei ca. < 6 m, da sich einige der oben genannten Fehler teilweise aufheben können bzw. nicht alle in vollem Umfang wirksam werden.

Zur Untersuchung der oben genannten möglichen Einflussfaktoren auf die Online-Genauigkeit wurden 3 Testflüge durchgeführt, von denen der Testflug in Stuttgart-Filderstadt im Nachfolgenden stellvertretend vorgestellt werden soll.

# 3 Testflug Filderstadt

Die Befliegung des Untersuchungsgebiets Stuttgart-Filderstadt liegt in der Nähe des Flughafens Stuttgart. Das Untersuchungsgebiet mit einer Fläche von 700 \* 500 m sollte in fünf Ost-West-Streifen und zwei Querstreifen beflogen werden. Der Helikopter wird üblicher weise vom Piloten auf Sicht navigiert und verfügt somit nicht über ein Flugführungssystem. Aus diesem Grund wurde eine Querüberlappung von 60 % gewählt. Da der Höhenunterschied in dem Gebiet nur 34 m beträgt waren zwei verschiedene Flughöhen vorgeschen, HONKAVAARA, E. (2004). Der Bildflug erfolgte am 21.8.2006 in zwei verschiedenen Höhen. Die Flughöhe des ersten Bildflugs betrug im Mittel 560 m über Grund (min. 500 m – max. 600 m). Während des zweiten Flugs betrug die Flughöhe im Mittel 640 m über Grund (min. 560 m – max. 690 m). Insgesamt wurde das Gebiet mit 15 Streifen abgedeckt, die GSD des 1 K \* 1 K großen Sensors reichte von 0.22 bis 0.3 m. Die tatsächliche Flugroute wich teilweise beträchtlich von der Sollroute ab und das für die

photogrammetrische Auswertung förderliche systematische Bildflugmuster konnten nicht wie geplant realisiert werden.

#### 3.1 Genauigkeitsuntersuchung der Online-Lösung

#### 3.1.1 Relativgenauigkeit Bild-zu-Bild

Der relative Fehler zwischen benachbarten kurz hintereinander ausgelösten Bildern (Bild-zu-Bild Genauigkeit) ist für die Berechnung der Fahrgeschwindigkeit und anderen Parametern aus der Online-Lösung weit wichtiger als die in den nachfolgenden Kapiteln intensiv diskutierte Absolutgenauigkeit des Systems. Die Relativgenauigkeit wurde anhand der aus der Online-Lösung georeferenzierten Bilder im Geotiff-Format in zwei Flugstreifen anhand natürlicher Punkte ermittelt. Dabei wurden die projizierten Koordinaten der Punkte in allen Bildern gemessen, in denen der Punkt sichtbar war. Je nach Fluggeschwindigkeit konnte ein Punkt in 26 - 40 Bildern gemessen werden. Es wurden jeweils 3 Punkte pro Flugstreifen gemessen, die sehr ähnliche Ergebnisse aufwiesen ( $R^2 > 0.85$ ). Das ist darauf zurückzuführen, dass systematische Fehler, wie z.B. Fehler in der Inneren Orientierung, Boresite-Winkel, fehlende Orthoentzerrung bei dieser Art der Fehlerbetrachtung weitestgehend wegfallen. Übrig bleiben unsystematische Fehler, wie z.B. Fehler in der Zeitsynchronisation, GPS/INS-Messrauschen etc., sowie die Ungenauigkeit bei der Punktbestimmung an natürlichen Punkten bei stark komprimierten Bildern. Die Werte der relativen Genauigkeit schwanken zwischen den Flugstreifen. Die Standardabweichung für den Streifen 4-2 liegt bei 1.06 m in X und 1.20 m in Y. Bei dem Streifen 5-2 liegt die Genauigkeit bei 1.19 m in X und 0.62 m in Y. Die Ursachen für den relativen Fehler und deren Unterschiede zwischen den Flugstreifen sind in den genannten unsystematischen Fehlern zu suchen (Zeitsynchronisation, GPS/INS-Messrauschen, Punktbestimmung).

#### 3.1.2 Absolutgenauigkeit

Der mittlere absolute Fehler im Objektraum, der aus der Online-Lösung heraus georeferenzierten Bilder wurde auf zweierlei Weise bestimmt.

- Durch einen Vergleich von 20 georeferenzi erten Bildern auf denen Passpunkte sichtbar waren. Der Vergleich der in den Bilder n gemessenen Lage der Passpunkte und deren wirklicher Position im Ortsraum ergibt eine n Lagefehler, der alle Fehlerquellen (innere und äußere Orientierung, DGM ... ) bei der Online-Prozessierung beinhaltet. Dabei werden die Beobachtungen für einen Passpunkt, der in mehreren Bildern zu sehen ist nicht gemittelt, sondern einzeln betrachtet. Der mittlere absolute Fehler (Standardabweichung) in x-Richtung betrug 3.51 m, in y-Richtung 2. 20 m. Der mittlere Fehlervektor in xy-Richtung betrug 4.65 m.
- 2. Die Elemente der äußeren Orientierung werden als feste Werte in eine passpunktlose Aerotriangulation eingeführt. Die Fehler tret en an den als Checkpunkte eingeführten Passpunkten auf. Mit diesem Verfahren können der Einfluss der inneren Orientierung und etwaige Fehler des Geländemodells bestimmt werden. Dabei werden die Beobachtungen an den einzelnen Passpunkten, die in mehreren Bildern gemessen werden können zu jeweils einem Wert zusammengefasst. Untersucht wurde der im nachfolgenden noch detaillierter beschriebene Block mit 144 Bildern in zwei verschiedenen Varianten mit und ohne innerer Orientierung.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Fehler (Standa rdabweichung und Mittelwert) mit der ersten Art der Fehleranalyse der Online-Lösung in der Größenordung übereinstimmt. Das kein flugrichtungsabhängiger Fehler zu beobachten ist, ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass mehrere Beobachtungen an einem Passpunkt zu einem Wert gemittelt werden.

#### 3.2 Aerotriangulation

Eine Aerotriangulation (AT) erfolgte an 144 Bildern aus 14 Flugstreifen mit der Software ER-DAS Imagine LPS. Die Längsüberlappung der Bilder betrug zwischen 60 – 70 %, je nach Fluggeschwindigkeit des Helikopters. Die Querüberlappung ist sehr variabel. Als Startwerte für die automatische Messung der Verknüpfungspunkte wurden als äußere Orientierung die Werte der prozessierten SBET-Lösung eingesetzt. Bei der AT wurden automatisch 2.104 Verknüpfungspunkte zwischen Bildern generiert. 25 Passpunkte wurden manuell in den entsprechenden Bildern gemessen. Bei der Aerotriangulation wurden die Passpunkte mit einer Genauigkeit von 5 cm eingeführt. Die GPS-Projektionszentren der äußeren Orientierung wurden für die Lage (x, y, z) mit ebenfalls 5 cm Genauigkeit angenommen. Als Winkelgenauigkeit der GPS/INS-Lösung ( $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ ) wurde 0.5° angenommen, um fehlerhafte Boresitewinkel kompensieren zu können. Im Ergebnis wurden die Klaffungen X = 0.058, Y = 0.066, Z = 0.019 [m] an den Passpunkten erzielt.

#### 3.3 Simultankalibrierung der inneren Orientierung

Die verwendete Software Leica LPS kann neben der Brennweite und der Hauptpunktlage auch die Radialverzeichnung  $r_v$  im Rahmen der Aerotriangulation mit zwei Parametern  $K_1$  und  $K_2$  schätzen (= Simultankalibrierung).

$$r_v = K_1 \times r_d^2 + K_2 \times r_d^4$$
 eq. (1)

wobei  $r_d = Radialentfernung$  vom Bildhauptpunkt im mm

Die Tangentialverzeichnung und weitere Parameter der inneren Orientierung (Scherung und Affinität) können mit der verwendeten Software nicht geschätzt werden. Die Parameter der inneren Orientierung sind untereinander stark korreliert, so dass bei einer gleichzeitigen Schätzung der Radialverzeichnung und der Bildpunktlage sowie der Brennweite größere Fehler bei der Bestimmung der einzelnen Parameter auftreten können. Diese fallen natürlich nicht bei der Lösung des untersuchten Blocks auf, da die Gesamtfehler durch die gleichzeitige Lösung aller Parameter minimiert werden. Kritisch ist insbesondere die Brennweite. Sie wird ohne Einbeziehung der Radialverzeichnung in der AT auf 24.98 mm geschätzt. Bei Berücksichtigung der Radialverzeichnung steigt der Wert auf ca. 25.26 mm. Dabei ist zu beachten, dass die Bestimmung der Brennweite im Rahmen einer Aerotriangulation grundsätzlich schwierig ist, da dies einen großen Höhenunterschied in den Bildern voraussetzt. Alternativ kann zur Erzeugung ausreichender Höhenunterschiede auch in zwei verschiedenen Höhen geflogen werden, wie im vorliegenden Fall geschehen. Erst eine unabhängige Überprüfung, d.h. Laborkalibrierung der inneren Orientierung, wie in Abb. 1 dargestellt, gibt eine zuverlässige Lösung, die sich natürlich in einem gewissen Umfang von der simultan ermittelten Lösung unterscheidet.


Abb. 1: Vergleich Simultan- und Laborkalibrierung der Radialverzeichnung DALSA Kamera 1M28 (Pixelgröße 10.6 μm) mit 25 mm B2514ER Pentax Objektiv

#### 4 Boresite Alignment

Mit dem Vergleich der indirekten Orientierung durch die Photogrammetrie und der direkten Orientierung durch GPS/INS können die Boresitewinkel bestimmt werden. Dies sind kleine konstante Winkeloffsets, zwischen dem Kamerakoordinatensystem und dem Koordinatensystem des Inertialsensors. Die Boresitewinkel können zur Verbesserung der Online-Lösung beitragen, da die Genauigkeitsuntersuchung der Online-Lösung deutliche systematische Anteile gezeigt hat. Zur Bestimmung der Boresitewinkel mit dem Ziel einer Verbesserung der Online-Lösung wurde eine Kalibrierung durchgeführt. Dazu wurden die gemessenen Koordinaten der Passpunkte und der Verknüpfungspunkte in das Modul CalQC der Applanix-Software eingeführt. Da die Ergebnisse nicht eindeutig waren, sind mehrere Iterationen bzw. Konfigurationen gerechnet worden. Die Parameter und Ergebnisse einer Kalibrierung mit 4 Passpunkten und 20 Checkpunkten sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst:

	x/ω	у/ф	z / κ
RMS of GCP Residuals (Meter)	0.015	0.042	0.003
RMS of Check Points Residuals (Meter)	0.368	0.559	1.079
Boresight Angles (Deg)	0.144	0.329	-0.049
RMS Boresight Angles (Deg)	0.167	0.156	0.142

Tab. 1: Parameter und Ergebnisse der Bestimmung der Boresitewinkel mit dem Programm CalQC

Die obige Konfiguration verdeutlicht die Genauigkeit der Kalibrierung im Objektraum an den Checkpunkten, die deutlich hinter den Ergebnissen der photogrammetrischen Entzerrung bleibt. Dies kann zum einen auf die schlechte zeitliche Synchronisation zurück zu führen sein und zum anderen auf die ungenau bestimmte innere Orientierung. Eine Trennung der beiden Faktoren kann nur durch eine Laborkalibrierung der inneren Orientierung erfolgen.

Die Anwendung der Verbesserungen der Boresite-Winkel auf die äußere Orientierung ergibt ein sicheres Maß für die tatsächliche Genauigkeit im Objektraum. Dabei gibt es die Möglichkeit die Bedeutung der inneren Orientierung auf die 3D-Genauigkeit zu ermitteln. Die nachfolgenden Graphiken untersuchen dies für den oben vorgestellten Block an 23 Passpunkten, sowohl für die Online-Lösung (VNAV) als auch für Postprocessing Lösung (SBET), Abb. 2 und Abb. 3.



Abb. 2: Vergleich der Standardabweichungen an Passpunkten bei direkter Orientierung durch Online-Lösung und Postprozessing - mit und ohne Anwendung der inneren Orientierung



Abb. 3: Vergleich der Mittelwerte an Passpunkten bei direkter Orientierung durch Online-Lösung und Postprozessing - mit und ohne Anwendung der inneren Orientierung

Die Graphiken zeigen, dass bei den Standardabweichungen in X, Y kein signifikanter Unterschied zwischen der Online-Lösung und der Postprozessing-Lösung besteht. Die Höhengenauigkeit ist um den Faktor 5 – 6 schlechter als die Lagegenauigkeit. Die Anwendung der inneren Orientierung führt zu einer Verbesserung der Genauigkeiten im Objektraum um ca. 10 – 15 %. Die Anwendung der inneren Orientierung zeigt, dass insbesondere die Verbesserung der Brennweite zu einer deutlichen Genauigkeitssteigerung in der Höhe führt. Die Veränderung der Radialverzeichnung und der Hauptpunktlage hingegen sind in ihrer Wirkung untergeordnet.

Als Ergebnis bleibt festzuhalten, dass die berechneten Boresite-Winkel deutlich zur Verbesserung der Online-Lösung beitragen können, da die Größenordung der Fehler an den Checkpunkten in etwa der potentiellen Genauigkeit der direkten Online-Orientierung entspricht. Der Boresitewinkel von über 0.3° in der Nickrichtung kann auch als wesentliche Ursache für die beobachteten flugrichtungsrichtungsabhängigen Fehler der Online-Lösung gesehen werden. Das theoretische Potential der Postprocessing Lösung konnte nicht erreicht werden. Dazu ist die Bestimmung der Boresite-Winkel zu ungenau gewesen. Schließlich ist der RMS der Boresitewinkel in der gleichen Größenordung wie die Boresitewinkel selber.

#### 5 Zusammenfassung

Die wichtigsten Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Untersuchungen für den Block Filderstadt lassen sich wie folgt zusammenfassen. Innerhalb eines Streifens ist die Relativgenauigkeit (= Bild-zu-Bild Genauigkeit) zwischen benachbarten Bildern bei einer Flughöhe von 500 m hoch ( $\pm$  1m  $\approx$  4 Pixel). Damit liegt die Online-Genauigkeit innerhalb der erwarteten Werte. Die Genauigkeit der indirekten photogrammetrischen Georeferenzierung der Bilder liegt im Subpixelbereich und unterstreicht das hohe geometrische Potential der Kamera. Durch die Bestimmung der Boresitewinkel konnte eine durchgreifende Verbesserung der direkten Georeferenzierung erzielt werden. Dabei konnte das theoretische Potential der Online-Lösung annähernd erreicht werden. Das theoretische Potential der Postprocessing-Lösung konnte nicht erreicht werden. Ursachen dafür sind in erster Linie mögliche Fehler in der inneren Orientierung (die nachträglich durch die Laborkalibrierung behoben wurden) bzw. in den unsystematischen zeitlichen Synchronisationsfehlern zwischen GPS/INS und den Bildern zu suchen. Diese unsystematischen Fehler induzierten weitere Ungenauigkeiten in der Bestimmung der Boresitewinkel.

#### 6 Literaturverzeichnis

- RUHE, M. et al (2007): Ruhe, M., Kühne, R., Ernst, I., Zuev, S., Hipp, E.; Air borne systems and data fusion for traffic surveillance and forecast for the Soccer World Cup. In: 86<sup>th</sup> Annual Meeting Transportation Research Board, TRB 2007, papers CD-ROM, Washington, January 2007.
- HONKAVAARA, E. (2004): In-flight calibration for direct georeferencing.- Proceedings of the XX ISRPS Congress 12.7.-23.7.2004, Istanbul Vol. XXXV, Part B., Commission I/6, pp. 166-171.

# UltraCamX, die neue digitale Luftbildkamera von Microsoft

### MICHAEL GRUBER<sup>1</sup> & SUSANNE SCHNEIDER<sup>1</sup>

Zusammenfassung: UltraCamX ist das Nachfolgemodell der weltweit erfolgreich eingesetzten digitalen Luftbildkamera UltraCamD. Die erste internationale Präsentation erfolgte im Mai 2006. Zur gleichen Zeit wurde der Kamerahersteller – das Grazer Unternehmen Vexcel Imaging GmbH – von Microsoft Corp. übernommen. Mit dem Jahreswechsel wurde die Auslieferung der ersten Serie begonnen. Eine detaillierte Vorstellung der neuen Kamera wird daher für die Fachwelt von Interesse sein. Der vorliegende Beitrag soll dieses Interesse befriedigen.

#### 1. Einleitung

Die digitale Großformatkamera UltraCamX wurde für die photogrammetrische Luftbildaufnahme entwickelt und im Mai 2006 international vorgestellt. Das Konzept der neuen Kamera ist auf den ersten Blick mit dem des Vorgängermodells UltraCamD vergleichbar. Bei etwas sorgfältigerer Betrachtung werden jedoch einige wesentliche Änderungen und Weiterentwicklungen erkennbar. Augenfällig ist das neue Bildformat mit 14430 \* 9420 Pixel, das der neuen Kamera eine höhere Produktivität in der Anwendung verleiht. Völlig überarbeitet und damit wesentlich komfortabler gestaltet wurde die Datenerfassungskomponente des Kamerasystems. Mehr Speichervolumen und erlauben auswechselbare Datenspeichermodule eine nahezu unbegrenzte Bilddatenerfassung während einer Bildflugmission. Ebenso überarbeitet und an das neue Sensormodul angepasst wurden die Betriebssoftware und die post-processing Software. Die ersten Flugprojekte mit der neuen Kamera führen zu Qualitätsaussagen zur Geometrie und zur radiometrischen Qualität. Die Ergebnisse aus diesen Flugprojekten werden im Detail vorgestellt. Durch die Übernahme des Kameraherstellers, Vexcel Imaging GmbH, von Microsoft Corp. eröffnet sich für den neuen Sensor ein viel versprechendes neues Anwendungsgebiet innerhalb der "Virtual Earth" Initiative des neuen Eigentümers.

#### 2. UltraCamX, Systemkomponenten und Eckdaten

Das Gesamtsystem der Kamera besteht aus der Sensoreinheit mit acht Kameraköpfen, einer Datenerfassungseinheit mit digitalen "Wechselmagazinen" und einer benutzerfreundlichen Konsole, dem "Interface Panel". Die Datenübertragung von der Sensoreinheit zur Datenerfassungseinheit wird von zwei Kabelsträngen in Infiniband-Technologie bewerkstelligt. Die Datenübertragung vom digitalen Wechselmagazin auf beliebige digitale Datenträger wird durch eine so genannte "Dockingstation" realisiert.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Microsoft Photogrammetry, Graz, <u>michgrub@microsoft.com</u>, susannes@microsoft.com



Abb.1: UltraCamX digitales Luftbildkamerasystem. Die Datenerfassungseinheit mit zwei Wechselmagazinen (links) und die Sensoreinheit (rechts) werden über das Interface Panel (mitte) kontrolliert.

#### 2.1 UltraCamX Sensoreinheit

Das Konstruktionsprinzip der UltraCamX Sensoreinheit wurde vom Vorgängermodell UltraCamD übernommen. Vier Kameraköpfe werden für die Zusammensetzung des großformatigen panchromatischen Bildes verwendet, weitere vier Kameraköpfe erzeugen das multispektrale Bild mit 4 Kanälen (Rot, Grün, Blau und nahes Infrarot).

Die Sensoreinheit der UltraCamX ist mit insgesamt 13 CCD Flächensensoren ausgestattet. Die von DALSA produzierte Type FTF5033 mit dem Format 5k \* 3.3k Pixel (36 mm \* 24 mm) wurde mit einer Bildelementgröße von 7.2µm entwickelt und zeigt hervorragende radiometrische Eigenschaften. In Kooperation mit LINOS/Rodenstock wurden darauf abgestimmte Objektive mit Nennbrennweiten von 100 mm für den panchromatischen Kamerateil und 33 mm für den Farbteil entwickelt. Das neue Bildformat der UltraCamX beträgt 14430 Pixel \* 9420 Pixel. Das Größenverhältnis zwischen Panchromatik und Farbe liegt exakt bei 3:1.



Abb.2: Die Sensoreinheit der UltraCamX mit 8 Kameraköpfen (4 panchromatische und 4 multispektrale Köpfe) und insgesamt 13 CCD Flächensensoren.

Tab. 1: UltraCamX, Eckdaten der Sensoreinheit

Eckdaten der UltraCamX Sensoreinheit	
Panchromatischer Sensor	
Multi Konus - Multi Sensor -Konzept	4 Kameraköpfe
Bildgröße in Pixel (quer zur Flugrichtung/in Flugrichtung)	14430 * 9420 Pixel
Physikalische Pixelgröße	7.2 μm
Physikalisches Bildformat (quer zur Flugrichtung/in Flugrichtung)	103.9 mm * 67.8 mm
Brennweite	100 mm
Relative Öffnung	f = 1/5.6
Öffnungswinkel /quer zur Flugrichtung/in Flugrichtung)	55°/37°
Multispektraler Sensor	
4 Kanäle (Rot, Grün, Blau, Nahes Infrarot)	4 Kameraköpfe
Bildgröße in Pixel (quer zur Flugrichtung/in Flugrichtung)	4992 * 3328 Pixel
Physikalische Pixelgröße	7.2 µm
Physikalisches Bildformat (quer zur Flugrichtung/in Flugrichtung)	34.7 mm * 23.9 mm
Brennweite	33 mm
Realitve Öffnung	f = 1/4
Allgemeines	
Verschlusszeiten	1/500 sek – 1/32 sek
Flugbewegungskompensation	TDI basierend, bis 50 pixel
Bildrate pro sek	1 Bild in 1.35 sek
A/DC Bandbreite	14 bit (16384 DN)
Radiometrische Auflösung	> 12 bit /Kanal

Die Zusammensetzung des großen Bildformates aus 9 Teilen und 4 Bildebenen wird durch die Geometrie des Masterkonus bestimmt und durch das Verfahren des Zusammenfügens der einzelnen Bildinhalte ("Stitching-Verfahren") kontrolliert. Die Überlappungsbereiche zwischen den Sensorflächen der 4 Bildebenen werden analysiert, Strukturen in den Bildinhalten verglichen und identische Positionen für die Bestimmung von Transformationsparametern genützt. Das Verfahren ist hoch überbestimmt und besticht durch die optimale Verteilung der betroffenen Bildpositionen. Zusätzlich werden Materialparameter in den Prozess eingebunden und damit das Temperaturverhalten der Kamera berücksichtigt.



Abb.3: Zusammensetzung des panchromatischen Bildes aus 4 Teilbildern mit 9 Segmenten. Der "Masterkonus" mit 4 CCD Flächensensoren bestimmt das Bildformat.

#### 2.2 UltraCamX Speichersystem

Die Datenaufzeichnung im Flugzeug wurde für das Kamerasystem UltraCamX wesentlich verbessert. Die Speichermodule – vergleichbar mit Wechselmagazinen – haben eine Kapazität von 4700 Aufnahmen und können innerhalb weniger Minuten ausgetauscht werden. Eine Vervielfachung der Speicherkapazität im Laufe einer Befliegung ist daher leicht möglich. Die Datensicherheit an Bord wird wie bei UltraCamD durch redundante und gleichzeitige Aufzeichnung auf zwei Speichermodule möglichst hoch gehalten.

Der Datentransport vom Flugzeug zur jeweiligen Bodenstation ist durch die abnehmbaren Speichermodule sehr vereinfacht und bedarf keiner zusätzlichen Arbeitsschritte.

Für den Datentransfer von der UltraCamX Dateneinheit auf ein beliebiges Speichermedium steht eine so genannte Dockingstation zur Verfügung. Diese erlaubt einen Datentransfer von bis zu 4000 Bildern in 8 Stunden über vier parallele Datentransferleitungen. Ein 24-Stunden Betrieb mit Befliegung, Datentransfer, Datenkontrolle und Freigabe der Dateneinheit ist daher leicht zu bewerkstelligen.



Abb.3: Das UltraCamX Datenerfassungsmodul mit abgenommenen Dateneinheiten (links) und die dazugehörige Dockingstation mit einer aufgesetzten Dateneinheit (rechts).

#### 3. Radiometrische Qualität des Sensors

Die Flächensensoren der UltraCamX Sensoreinheit bieten eine radiometrische Bandbreite von mehr als 75 dB (> 12 bit). Dieses hochwertige analoge Signal wird mit einem Analog/Digital Wandler mit 14 bit Auflösungsvermögen (16384 DN) bearbeitet. Die gesamte digitale Nachbearbeitung erfolgt schließlich mit 16 bit (65536 DN). Diese hohe radiometrische Auflösung führt auch bei hohem Objektkontrast zu Bildern mit sichtbaren Strukturen in dunklen und hellen Bereichen. Die automatische Auswertung durch digitalen Bildvergleich, die manuelle Stereomessung und die Bildinterpretation werden durch diese hohe radiometrische Bildqualität wesentlich unterstützt.

Die radiometrische Analyse von Testbildern hat bis zu 7400 unterscheidbare Intensitätswerte bei 16 bit Bandbreite ergeben. Das entspricht einer Dynamik von mehr als 75 dB oder 12.8 bit. Der Rauschpegel der Sensoren wurde mit weniger als 3 DN gemessen. Die Bildinformation der UltraCamX liefert damit mehr als 11 bit praktisch rauschfreie Intensitätsinformation.



Abb. 4: Bild 1090 eines UltraCamX Testfluges über der Stadt Graz (links). Zwei Ausschnitte mit hohem lokalen Kontrast (rechts) zeigen Strukturen in hellen und dunklen Bereichen und Intensitätsverteilungen mit mehr als 12 bit Bandbreite (rechts unten).

Abbildung 4 zeigt Bild 1090 einer Flugmission vom 27. März 2007, über Graz, in 900 m Höhe über dem Boden (GSD = 6.5 cm). Um die radiometrische Auflösung zu zeigen wurden Bildausschnitte mit hohem Kontrastumfang ausgewählt und dargestellt. Durch eine Histogrammanalyse im Rohbild mit 16 bit konnten die Intensitäten der dunkelsten und hellsten Bereiche bestimmt werden. Beide Bereiche weisen demnach Intensitätswerte zwischen 350 DN bis zu 7800 DN auf.

#### 4. UltraCam X Geometrieleistung

Die geometrische Qualität des Sensors wird durch ein mehrstufiges Verfahren sichergestellt. Die Laborkalibrierung wird zur Bestimmung aller Geometrieparameter der Kamera routinemäßig durchgeführt. Ergebnisse mit einer mittleren Abweichung von Bildpositionen deutlich unter 1  $\mu$ m werden dabei erzielt. Danach folgt die Befliegung eines Testfeldes mit vermessenen Passpunkten und anschließender automatische Triangulierung mit Match-AT, einem Softwareprodukt der Firma INPHO, Stuttgart. Die Prozessierung der Bilder mit OPC (Office Processing Center) erlaubt schließlich eine begleitende Qualitätskontrolle für jede einzelne Aufnahme. Alle Parameter, die im Laufe des Prozesses berechnet werden, können in einer XML basierten Dokumentation abgerufen werden.

Die Ergebnisse aus der Befliegung des Testfeldes zeigen, dass eine innere geometrische Genauigkeit unter 1  $\mu$ m (sigma\_o < 1.0  $\mu$ m) erreicht werden kann. Durch die anspruchsvolle Flugplanung mit hoher Überdeckung (80% in Flugrichtung und 60% zwischen Flugstreifen) und zwei Flugrichtungen (9 Streifen Nord-Süd Richtung und 5 Streifen in Ost-West Richtung) wird eine hohe Redundanz in den 404 Aufnahmen erzeugt. Die Ausgleichung kann daher mit hoher Überbestimmung erfolgen.



Abb. 5: Das Testfeld Gleisdorf östlich von Graz mit einer Gesamtausdehnung von 7 km \* 5 km (links) und derzeit 23 Passpunktregionen (rechts). Die Befliegungen erfolgen mit hoher Überdeckung und Flugstreifen in N-S und O-W Richtung.

Eine durchgreifende Kontrolle der Ergebnisse aus der Aerotriangulation wurde anhand von Check-Punkten durchgeführt. Diese Punkte mit bekannten Koordinaten wurden in der Bündelausgleichung neu bestimmt und das Ergebnis mit den Sollwerten verglichen. Das Projekt wurde in mehreren Varianten mit dem Bündelausgleichsprogramm BINGO gerechnet und Ergebnisse mit unterschiedlicher Bildanzahl sowie mit Einbeziehung von GPS/IMU Daten (erstellt durch IGI mbH, Kreuztal) erfolgen.



Abb. 6: Ergebnisse aus der Aerotriangulation von 14 Fluglinien, 12 Passpunkten und 7 Checkpunkten und einer Flughöhe über Grund von 1400 m (GSD = 10 cm). Die Höhenabweichungen sind graphisch hervorgehoben und bleiben in den Checkpunkten unter 10 cm (RMSE = 6 cm).

Tab. 2: Ergebnisse der Ausgleichung mit BINGO. Die Varianten der Berechnung beziehen sich auf die Einbeziehung von GPS/IMU Beobachtungen und auf zusätzlich Verzeichnungsparameter.

Variante 1: Ausgleichumg	mit GPS/	IMU und z	usätzlich	her Verz	eichnung
sigma_o = 0.76 µm					
RMS Checkpunkt Residuen		32.	46.	50. (m	im )
RMS Passpunkt Residuen:		30.	47.	66. (m	ım )
RMS GPS Residuen:		34.	32.	31. (m	im )
RMS IMU Residuen:		2.4	2.5	2.9 (m	ıg)
Variante 2: Ausgleichung	mit GPS/	IMU ohne	zusätzlio	cher Ver	zeichnung
sigma_o = 0.77 µm					
RMS Checkpunkt Residuen		32.	46.	61. (	mm )
RMS Passpunkt Residuen:		31.	47.	66. (	mm )
RMS GPS Residuen:		35.	32.	33. (	mm )
RMS IMU Residuen:		2.6	2.5	2.9 (	mg)
Variante 3: Ausgleichung	ohne GP	S/IMU mit	zusätzli	icher Ve	erzeichnung
sigma_o = 0.72 μm					
RMS Checkpunkt Residuen		33.	43.	29. (	mm )
RMS Passpunkt Residuen:		25.	53.	45. (	mm )
Variante 4: Ausgleichung	ohne GP	S/IMU ohn	e zusätzl	Licher V	erzeichnung
(mit 14 passpunkten und	5 Checkpu	nkten)			
sigma_o = 0.72 µm	-				
RMS Checkpunkt Residuen		30.	43.	108. (	mm )
RMS Passpunkt Residuen:		20.	27.	22. (	mm )

Aus den Ergebnissen der Triangulierung kann die ausgezeichnete Genauigkeit der Bildmessung mit einem daraus resultierenden Sigma\_o von 0.72  $\mu$ m bis 0.77  $\mu$ m abgeleitet werden. Die Genauigkeit der Passpunkte und der Checkpunkte liegt bei 3 cm bis 5 cm in der Lage (= 0.3 – 0.5 Pixel) und erreicht damit die Definitionsgenauigkeit der natürlichen Passpunkte. Die Höhengenauigkeit variiert und zeigt, dass GPS/IMU Beobachtungen die Überbrückung von größeren Bereichen ohne Passpunkte – hier ca. 20 Basislängen bei 80% Längsüberdeckung - sehr gut unterstützen. Es ist allerdings bemerkenswert, dass Variante 3 bessere Ergebnisse liefert. Die hier mitbestimmte radialsymmetrische Restverzeichnung ist sehr gering und bleibt unter 1  $\mu$ m. Die mittlere quadratische Abweichung in den Checkpunkten wurde mit knapp 3 cm berechnet. Ohne die Mitbestimmung von Verzeichnungsparametern sinkt die Qualität in der Höhenmessung. Variante 4 weist eine mittlere quadratische Abweichung von knapp 11 cm aus, das entspricht 0.08 ‰ der Flughöhe.

Die hier gezeigten Daten weisen das geometrische Potential des Sensors eindrucksvoll nach. Die hohe innere Messgenauigkeit wird durch den niedrigen sigma\_o Wert nachgewiesen. Etwaige verbleibende systematische Bildfehler können durch den Bündelausgleich mitbestimmt und damit berücksichtigt werden. Die Qualität der Höhenmessgenauigkeit wird damit wesentlich verbessert.

#### 5. Microsoft Photogrammetry – Ein Ausblick

Die Übernahme des Kameraherstellers Vexcel Imaging GmbH, Graz, durch Microsoft Corp, Redmomd, WA, ist in direktem Zusammenhang mit der Projektinitiative "Virtual Earth" zu sehen. Ziel dieser Initiative ist die qualitativ hochwertige und detailreiche Darstellung von Siedlungsräumen auf einer allgemein zugänglichen Internet-Plattform und die Verknüpfung dieser Daten mit Adressen. Damit ist wiederum eine gezielte Suche und Sortierung verknüpfter Daten möglich. Die digitale Welt wird handhabbar.

Vorerst liegt der Schwerpunkt auf US-amerikanischen Städten, die im Internet 3-dimensional zur allgemeinen Verfügung stehen. Ab Mitte 2007 ist mit etwa 100 Städten zu rechnen. Die Gesamtaufnahme des weltweiten Siedlungsraumes wird Zug um Zug fortgesetzt und verfeinert. Digitale Luftbilder von hoher Qualität mit einer Bodenauflösung von mindestens 15 cm sind die Basis, UltraCamX ist der bevorzugte Sensor. Mit einer Längsüberdeckung von 80% und einer Querüberdeckung von 60% entstehen Quelldaten, die einen digitalen Modellierungsprozess unterstützen und Verdeckungen nahezu ausschließen. Die automatische dreidimensionale Modellierung von Städten mit photorealistischer Textur gelingt. Das Datenvolumen der entstehenden Datenbank wird schließlich 22 PetaByte betragen.



Abb. 7: Vollautomatisch erstelltes dreidimensionales Modell von Philadelphia. Die Daten sind Grundlage der "Virtual Earth" Platform und unter http://maps.live.com allgemein zugänglich.

#### Literatur:

- GRUBER, M. & LADSTÄTTER, R., 2006: Geometric issues of the digital large format aerial camera UltraCamD. International Calibration and Orientation Workshop EuroCOW 2006 Proceedings, 25-27 Jänner 2006, Castelldefels, Spanien.
- GRUBER M., LEBERL, F. & PERKO, R. (2003) Paradigmenwechsel in der Photogrammetrie durch Digitale Luftbildaufnahme? Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation.
- KRÖPFL et al. (2004): Geometric Calibration of The Digital Large Format Aerial Camera Ultracam. The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, VOL XXXV/1, p. 42 ff., July 2004, Istanbul, Turkey.

- KRUCK, E. (1984): BINGO: Ein Bündelprogramm zur Simultanausgleichung für Ingenieuranwendungen – Möglichkeiten und praktische Ergebnisse, Intenational Archive for Photogrammetry and Remote Sensing, Rio de Janairo 1984
- KREMER J. & GRUBER M. (2004): Operation of The Ultracamd Together with CCNS4/Aerocontrol – First Experiences and Results. The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, VOL XXXV/1, p. 172 ff., July 2004, Istanbul, Turkey.
- LEBERL, F. et al. (2003): The UltraCam Large Format Aerial Digital Camera System, Proceedings of the American Society For Photogrammetry & Remote Sensing, 5-9 May, 2003, Anchorage, Alaska.

# Potential großformatiger digitaler Luftbildkameras

#### KARSTEN JACOBSEN

Zusammenfassung: Großformatige digitale Luftbildkameras, wie die Intergraph DMC und die Vexcel UltraCam, ersetzen verstärkt analoge photogrammetrischen Kameras. Die synthetischen Bilder dieser Kameras basieren auf jeweils mehreren Teilkameras, die einzeln kalibriert sind. Die Kalibrierungen werden bei der Erstellung der synthetischen Bilder berücksichtigt, womit theoretisch perfekte zentralperspektive Aufnahmen vorliegen sollten. In der Praxis zeigte sich allerdings, dass für hohe Genauigkeiten eine Selbstkalibrierung erforderlich ist. Die systematischen Bildfehler können nur vollständig modelliert werden, wenn speziell an die geometrischen Kameraeigenschaften angepasste zusätzliche Parameter verwendet werden. Durch die systematischen Bildfehler werden Modelldeformationen hervorgerufen, die für genaue digitale Höhenmodelle nicht vernachlässigbar sind. Der Vergleich des Informationsgehaltes der digitalen mit den analogen Kameras ist komplex und kann nur durch den Vergleich der Obiekterkennbarkeit bestimmt werden. Mittels der Auswertung einer Reihe unterschiedlicher digitaler und analoger Aufnahmen der gleichen Gebiete zeigte sich, dass für digitale Aufnahmen eine 1,5 bis 2-fache Objektpixelgröße als bei analogen Luftbildern, die mit 20µm Pixelgröße gescannt wurden, ausreichend ist, um die gleiche Objekterkennbarkeit zu gewährleisten.

### 1 Einführung

Photogrammetrische Auswertungen werden heute fast ausschließlich mittels digitaler photogrammetrischer Arbeitsstationen durchgeführt. Analoge Luftbilder müssen hierfür gescannt werden, wobei eine Reduktion der radiometrischen und geometrischen Bildqualität unvermeidlich ist. Dieser Arbeitsschritt, wie auch die fotografische Entwicklung, kann vermieden werden, wenn die Aufnahmen digital erfolgen. Digitale Kameras sind darüber hinaus lichtempfindlicher und es können zumindest mit den großformatigen Flächenkameras, wie Intergraph DMC und Vexcel UltraCam, Aufnahmen mit einem niedrigen Sonnenstand erstellt werden, der keine ausreichende Bildqualität analoger Kameras zulässt. Darüber hinaus sind digitale Bilder nicht durch das Filmkorn gestört, das in den gescannten Aufnahmen zu einem Rauschen führt und die automatische Bildzuordnung negativ beeinträchtigt. Es hat sich auch gezeigt, dass die erzielbare Bildgenauigkeit der DMC und der UltraCamD wie auch der Informationsgehalt besser ist, als bei analogen Kameras. Neben den großformatigen, digitalen, flächenhaften Luftbildkameras gibt es auch Drei-Zeilen-Kameras wie die Leica ADS40. Diese werden hier nicht betrachtet, da sie nicht direkt vergleichbar sind. In der Praxis hat sich auch herausgestellt, das der Anwendungsbereich etwas unterschiedlich ist - die Flächenkameras werden für die Kartenerstellung bevorzugt, während die Dreizeilenkameras für großflächige Orthophotoprojekte stärker herangezogen werden.

Für den Vergleich von Kameras sind im Wesentlichen die geometrische Genauigkeit und der Informationsgehalt von Bedeutung. Unter Informationsgehalt wird im Prinzip verstanden, wie viele Objekte in einer Aufnahme erkannt werden können. Der Zusammenhang ist allerdings

komplizierter als es ein einfacher Vergleich der Bildauflösung in Linienpaare/mm für analoge Fotos mit der Pixelgröße digitaler Bilder.

#### 2 Großformatige, digitale, flächenhafte Luftbildkameras

Für digitale photogrammetrische Aufnahmen werden CCD-Sensoren bevorzugt, da sie gegenüber den CMOS-Sensoren normalerweise eine bessere Bildqualität aufweisen. Es gibt zurzeit keine CCD-Arrays auf dem Markt, die von der Größe her einen vergleichbaren Informationsgehalt wie die analogen Luftbilder aufweisen und gleichzeitig eine kurze Auslesezeit und eine ausreichende Bildqualität haben. Aus diesem Grund setzen die großflächigen digitalen Kameras das Bild aus mehreren Teilbildern zusammen (Abbildungen 1 und 2).



Teilbilder zu dem homogenen virtuellen Bild

(LEBERL et al 2002)

Die DMC setzt das für den Nutzer verfügbare homogene, virtuelle Bild aus den 4 Bildern konvergent angeordneter Teilkameras zusammen, während die UltraCam die Teilbilder von 4 parallel angeordneten Kameras zu einem virtuellen Bild zusammensetzt. Bei der Erstellung des virtuellen Bildes werden die Kamerakalibrierungen der Teilkameras verwendet, so dass die virtuellen Bilder theoretisch perfekte zentralperspektive Aufnahmen sind, wenn sich die Kameras unter den Flugbedingungen nicht verändern würden.

	Intergraph	Vexcel	Vexcel	Applanix DSS	DIMAC	
	DMC	UltraCamD	UltraCamX			
С	120 mm	100mm	100mm	35mm / 55mm	60/80/100/120	
Pixelgröße	12µm	9µm	7,2µm	9µm	6.8µm	
Pixelanzahl	7 680	7 500	9420	4 092	7200	
Flugrichtung						
Pixelanzahl	13 824	11 500	14430	4 077	10500	
quer						
Bildformat	92.2*165,9	67,5*103,5	67.8*103.5	36,8*36,7	49 * 71.4	
[mm]						
Höhe/Basis	3.2	3.7	3.7	2,4/3,7	3,1 / 4,1 / 5,1/6,1	

Tabelle 1: Technische Daten flächenhafter Luftbildkameras

Neben der Vexcel UltraCamD ist seit kurzer Zeit die UltraCamX verfügbar, die nahezu gleichgroße CCD-Arrays verwendet, die allerdings kleinere Pixel haben und damit die Anzahl der Pixel des virtuellen Bildes erhöhen. Bilder der UltraCamX standen nicht zur Verfügung und konnten somit nicht untersucht werden. Eine Verkleinerung der Pixelgröße muss nicht zu einem verbesserten Informationsgehalt des Gesamtbildes führen, da mit kleineren Pixeln auch die Bildqualität abnimmt. Die DMC und die UltraCam arbeiten mit einem TDI-Sensor (transfer delay and integration), der einer elektronischen Vorwärtsbewegung entspricht und die Energie über eine längere Zeit als Einzelpixel integrieren kann. Aus diesem Grund können die Kameras auch nicht um 90° horizontal gedreht eingesetzt werden. Neben der DMC und der UltraCam sind in Tabelle 1 als Beispiele noch 2 weitere digitale Flächenkameras aufgeführt, bei denen die DIMAC das große Bildformat durch die Zusammensetzung von 2 Teilkameras erreicht. Diese Kameras haben jedoch ein etwas anderes Anwendungsfeld, weswegen sie nicht in die Untersuchungen einbezogen wurden.

### 3 Informationsgehalt

Die Auflösung analoger Kameras wird üblicherweise in Linienpaaren/mm (lp/mm) ausgedrückt, was allerdings nicht die komplette Information einer Modulationsübertragungsfunktion wiedergibt. In der Praxis wird eine Auflösung von etwa 40 lp/mm erreicht. Als vereinfachter Vergleich von Analog- mit Digitalbildern wird ein Linienpaar mit 2 Pixeln gleichgesetzt, womit die Bildpixelgröße 12µm entsprechen würde. Dementsprechend müsste ein analoges Luftbild einen Informationsgehalt entsprechend (80 x 230)<sup>2</sup> = 18 400<sup>2</sup> haben. In der Praxis werden analoge Luftbilder allerdings normalerweise mit etwa 20µm Pixelgröße gescannt, entsprechend (50 x 230)<sup>2</sup> = 11500<sup>2</sup> Pixeln. Diese Pixelgröße wird gewählt, weil dadurch praktisch kein Informationsverlust eintritt und die Auswertegenauigkeit wegen möglicher Sub-Pixelgröße kaum beeinträchtigt wird. Der Informationsgehalt ist allerdings komplexer als es diesem einfachen Vergleich entspricht, weswegen im Rahmen einer Diplomarbeit (OSWALD 2006) analoge Luftbilder durch photogrammetrische Auswertungen mit DMC- und UltraCamD-Aufnahmen verglichen wurden.

Der Vergleich des Informationsinhaltes der Bilder lässt sich effektiv nur durch Vergleich photogrammetrischer Auswertungen erreichen. Der Vergleich von Bildern sollte auch die Lage des Ausschnittes im Bild berücksichtigen. Die Kalibrierungszertifikate analoger Kameras geben die Abhängigkeit der Auflösung vom radialen Bildhauptpunktabstand an. Die effektive Auflösung einer digitalen Aufnahme lässt sich durch Kantenanalyse bestimmen. Ändert sich die Helligkeit eines Objektes an einer Kante sprunghaft, so wird das im Bild etwas verschmiert wieder gegeben. Die Differenzierung eines Grauwertprofils über eine Kante führt zur point spread function, aus der die Auflösung abgeleitet werden kann. Eine Untersuchung der effektiven Auflösung der DMC und der UltraCamD durch Kantenanalyse zeigte bei der DMC keinen Qualitätsabfall zu den Bildecken, bei der UltraCamD trat dagegen in den Bildecken ein Abfall der Bildqualität von durchschnittlich 30% auf. Alle Vergleiche des Informationsgehaltes wurden mit mehr zentral gelegenen Bildausschnitten durchgeführt.

Eine vereinfachte Übersicht der vergleichenden Auswertungen ist in den Tabellen 2 und 3 dargestellt. Es zeigte sich, dass das Scannen analoger Luftbilder mit 12µm Pixelgröße gegenüber 20µm praktisch keinen wesentlichen Vorteil hat. Die gescannten Analogbilder sind in Schattenbereichen praktisch nicht auszuwerten, wogegen die originalen Digitalbilder in Schattenbereichen noch gute Details zeigen. Aufgrund aller Details der Untersuchung kann gesagt werden, das der Informationsgehalt der originalen digitalen Aufnahmen etwa dem des von analogen Luftbildern, gescannt mit 20µm, die etwa eine etwa 1,5-fache Objektpixelgröße wie die Digitalbilder haben, entspricht. Das bedeutet für den Vergleich des Informationsgehalts, dass ein analoges gescanntes Luftbild etwa (230mm/20µm/1,5)<sup>2</sup> = 7667<sup>2</sup> Pixeln entspricht. Damit sind der Informationsgehalt der Intergraph DMC und der UltraCamD größer als der eines normalen analogen Luftbildes, wobei die originalen Luftbilder wegen des besseren Kontrastes und des fehlenden Rauschens durch das Filmkorn leichter auszuwerten sind.

Benutzte Bilder,	Objektpixelgröße nicht identifizierbare		Gesamtlänge der		
Analogbilder mit	[cm] Fläche [%]		Vektoren der		
Scan-Pixelgröße			Klassifizierung [m]		
UltraCamD	34	11.8	3.920		
Analog [20µm]	20	6,9	3.898		
DMC	18	2,9	4.648		
UltraCamD	17	6	4.639		
Analog [20µm]	10	3,6	4.610		
DMC	9,2	1,3	5.074		
Analog [12µm]	6,5	2,6	4.670		

Tabelle 2: Vergleich photogrammetrischer Auswertungen, EuroSDR Testdaten Frederikstad

Objektpixelgröße Nicht identifiziert		Gesamtlänge der		
bild mit Scan- [cm] Flächen [%]		Vektoren der		
		Klassifizierung [m]		
8.5	12,9%	6.202		
9	3,6%	6.907		
	Objektpixelgröße [cm] 8.5 9	Objektpixelgröße [cm]Nicht identifizierbare Flächen [%]8.512,9%93,6%		

Tabelle 3: Vergleich photogrammetrischer Auswertungen, Bergbaugebiet

#### 4 Geometrie der digitalen Flächenkameras

Die Geometrie der digitalen Flächenkameras wird durch den hochauflösenden panchromatischen Kanal bestimmt. Die niedriger auflösenden Farbkanäle können mit dem hochauflösenden panchromatischen Kanal zu hochauflösenden Farbbildern fusioniert werden, die Geometrie wird jedoch weiterhin durch den panchromatischen Kanal bestimmt. Die Farbe stört für exakte geometrische Auswertungen nur, da Farbsäume nicht immer vermeidbar sind. Aus diesem Grund wurden die geometrischen Auswertungen nur mit den panchromatischen Aufnahmen durchgeführt.

Wie in Kapitel 2 erwähnt, werden die virtuellen Bilder der DMC und der UltraCam aus den Teilbildern mittels Verknüpfung durch automatische Bildzuordnung der überlappenden Teile

zusammengesetzt. Die Laborkalibrierung der Teilkameras wird bei der Berechnung der virtuellen Bilder berücksichtigt. damit sollten die virtuellen Bilder perfekte zentralperspektive Aufnahmen sein. Durch die Temperatureinflüsse und den Luftdruck ändern sich die Teilkameras jedoch während des Bildfluges und erfordern, wie analoge Luftbilder eine Blockausgleichung mit Selbstkalibrierung durch zusätzliche Parameter. Die Residuen - verbleidende Bildkoordinatenfehler - der Blockausgleichung enthalten Informationen über die systematischen Bildfehler, oder korrekter, die Abweichung der tatsächlichen Bildgeometrie von dem mathematischen Modell der Zentralperspektive. Die systematischen Anteile der Residuen sind durch zufällige Anteile überlagert, aus diesem Grund werden im hannoverschen Programmsystem BLUH die Residuen entsprechend ihrer Lage des zugehörigen Bildpunktes im Bildraum überlagert und in kleinen Teilflächen gemittelt.

Die in Abbildung 3 dargestellten gemittelten Residuen zeigen systematische Bildfehler an, die größer sind als die gemittelten Residuen da Teile der systematischen Bildfehler durch die Bildorientierung und die unbekannten Objektkoordinaten kompensiert werden. Alle vier entsprechenden Blöcke weisen etwa 80% Längs- und 60% Querüberdeckung auf und sind durch Querstreifen stabilisiert. Die Blöcke haben zwischen 426 und 2282 Bilder. Die systematischen Bildfehler des UltraCamD-Blockes Istanbul wurden nicht versehentlich gedreht, sondern entsprechen dem Bildkoordinatensystem, das bei der UltraCam meistens um 90° gegenüber der Basis gedreht ist.

DMC-Block Gent	DMC-Block Rubi	UltraCamD-Block	UltraCamD-Block
		Bergwerk	Istanbul

Abb. 3: Gemittelte Residuen von Blockausgleichungen ohne Selbstkalibrierung

Die systematischen Bildfehler sind teilweise, wie es die Struktur der gemittelten Residuen anzeigt, auf die Teilbilder oder die Zusammenfügung der Teilbilder zurückzuführen. Die normalen zusätzlichen Parameter, die auch für die Bearbeitung analoger Bilder benutzt werden, sind nicht in der Lage, diese speziellen geometrischen Situationen exakt zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wurden in das Programm BLUH spezielle zusätzliche Parameter für die DMC und die UltraCam eingeführt (Tabelle 4). Die speziellen Parameter berücksichtigen, dass die Teilbilder mit Hilfe von Verknüpfungspunkten zusammengeführt werden, somit Lücken innerhalb der virtuellen Bilder ausgeschlossen sind.

29. DMC - Exzentrizität der Projektionszentren 30-33.  $x' = x + P32*(x^2-32x)$  Synchronisation der DMC Teilbilder 34.  $x' = x - x^* v^* P34$  $\mathbf{v}' = \mathbf{v}$ Orientierungsfehler DMC X 1  $y' = y - x^*y^*P35$  Orientierungsfehler DMC Y 1 35. x' = x36 – 41 entsprechend 34 – 35 für andere Teilbilder 42 – 49 Maßstabsfehler für UltraCam-Teilbilder 50 – 57 Verschiebung in x für UltraCam-Teilbilder 58 – 65 Verschiebung in v für UltraCam-Teilbilder 66 - 73 Drehung UltraCam-Teilbilder 74 – 77 radialsymmetrische Verzeichnung der DMC-Teilbilder 78 einheitliche Änderung der Öffnungswinkel der DMC-Teilbilder 80 einheitliche radialsymmetrische Verzeichnung der DMC-Teilbilder

Tabelle 4: Spezielle zusätzliche Parameter für die DMC und die UltraCam

Die kameraspezifischen zusätzlichen Parameter können mit den 12 Standardparametern (Parameter 1-12) des Programms BLUH kombiniert werden. Die Auswirkung der DMC-Exzentrizität war in keinem Fall signifikant, was auch den theoretischen Überlegungen entspricht, weswegen dieser Parameter für die weiteren Untersuchungen nicht mit aufgeführt wird. Das Programm BLUH entfernt alle nicht signifikanten und zu hoch korrelierten Parameter von der Ausgleichung, so dass die letzte Iteration nur mit den sinnvollen zusätzlichen Parametern durchgeführt wird. Die Standardabweichung der Gewichtseinheit (Bildkoordinatengenauigkeit) liegt zwischen 1,6 $\mu$ m und 2,0 $\mu$ m für die DMC und zwischen 2,3 $\mu$ m und 3,0 $\mu$ m für die UltraCamD und damit in einem Bereich, der mit analogen Bildern nicht erreichbar ist.



Abb. 4: Ergebnisse der Blockausgleichungen an unabhängigen Vergleichspunkten



Abb. 5: Ergebnisse der Blockausgleichungen an unabhängigen Vergleichspunkten



Abb.: 6: Systematische Bildfehler der optimalen Ausgleichungen

DMC mit Vektormaßstab 5µm, UltraCamD mit Vektormaßstab 10µm Die Genauigkeit der Ausgleichung (Abb. 4 und 5) wurde mit unabhängigen Vergleichspunkten bestimmt. Diese Methode ist zwar von der Objektkoordinatengenauigkeit abhängig, ist jedoch nicht wie die innere Genauigkeit einer Blockausgleichung von nicht erfassten systematischen Fehlern abhängig. Die Datensätze der 4 beschriebenen Blöcke sind ähnlich. Die Objektpixelgröße variiert zwischen 7,7cm und 9,8cm. In jedem Fall ist die Passpunktbesetzung schwach, was sich an der Höhengenauigkeit der Blockausgleichungen ohne Selbstkalibrierung zeigt. Durch die Selbstkalibrierung verbessert sich besonders die

Höhengenauigkeit, während sich die Lagegenauigkeit durch die zusätzlichen Parameter bei der DMC um durchschnittlich 8% und bei der UltraCamD um 18% verbessert. Die erzielten Lagegenauigkeiten liegen zwischen 0.25 und 0.32 der Objektpixelgröße. Durch die allgemeinen zusätzlichen Parameter (1-12) wird bereits fast die beste Genauigkeit erreicht. Die speziellen Ansätze für die DMC und die UltraCam alleine reichen nicht aus, in Verbindung mit den allgemeinen zusätzlichen Parametern führen sie nur zu einer geringfügigen Genauigkeitssteigerung. Bei der DMC wurden die besten Genauigkeiten durch die Kombination der allgemeinen Parameter mit den Parametern 78 und 80 ereicht, die eine gleichmäßige Änderung der Teilkameras beschreiben.



Die Berücksichtigung der durch Selbstkalibrierung bestimmten systematischen Bildfehler in der Blockausgleichung ist unproblematisch. Anders sieht es bei der anschließenden Modellauswertung normalerweise können in den photogrammetrischen aus Arbeitsstationen die systematischen Bildfehler nicht berücksichtigt werden und es kommt zu Modelldeformationen. In der Lage ist die Auswirkung in der Regel vernachlässigbar, nicht jedoch in der Höhe wie Abbildung 7 zeigt. Die erwarteten Höhenauswertegenauigkeiten der Blöcke liegen bei dem Block Rubi bei SZ=7,6cm und in dem Bergbaugebiet bei SZ=9,2cm. Eine Abhilfe kann die Änderung der Bildgeometrie durch die systematischen Bildfehler, wie durch das hannoversche Programm IMGEO oder eine a posteriori Korrektur von Höhenmodellen, wie durch das Programm DEMCOR, bringen.

#### 5 Schlussfolgerung

Digitale Luftbildflächenkameras wie die Intergraph DMC und die Vexcel UltraCam setzen sich immer stärker für die Kartenerstellung durch. Ihre Bildqualität ist besser als die der analogen Luftbilder und es zeigte sich, dass der Informationsgehalt einer einzelnen Aufnahme auch größer ist als der eines analogen Luftbildes. Außerdem können die digitalen Kameras auch noch unter ungünstigeren Lichtverhältnissen eingesetzt werden. Die mit den digitalen Kameras erzielten Genauigkeiten sind besser als die mit den analogen Aufnahmen, es sind jedoch bei beiden Gruppen systematische Bildfehler vorhanden, die eine Blockausgleichung

mit Selbstkalibrierung erfordern. Es konnte mit den allgemeinen zusätzlichen Parametern, die auch für analoge Bilder eingesetzt werden, fast die beste Genauigkeit erreicht werden, die speziellen zusätzlichen Parameter für die DMC und die Ultracam führten nur zu einer geringfügigen Genauigkeitssteigerung. Wie bei den analogen Luftbildern sind Modelldeformationen vorhanden, die die Höhe negativ beeinflussen, wenn sie nicht berücksichtigt werden. Bei den analogen Luftbildkameras wurde das bislang normalerweise ignoriert. Sowohl Intergraph als auch Vexcel arbeiten zurzeit an verbesserten Kalibrierungsverfahren, um die systematischen Fehler auf ein vernachlässigbares Maß zu verkleinern.

## 6 Danksagung

Ich danke Hansa Luftbild, Münster, dem Cartographic Institute of Catalonia, Barcelona, der Deutschen Steinkohle, Herne und BIMTAS, Istanbul, für die Bereitstellung der Daten.

## 7 Literaturverzeichnis

- Alamús, R., Kornus, W., Palà, V., Pérez, F., Arbiol, R., Bonet, R., Costa, J. Hernández, J., Marimon, J., Ortiz, M.A., Palma, E., Racero, M., Talaya, J., 2005: Validation Process of the ICC Digital Camera, Hannover Workshop 2005
- Doerstel, C., Zeitler, W., Jacobsen, K., 2002: Geometric Calibration of the DMC: Method and Results, IntArchPhRS (34) Part 1 Com I, pp 324 333, Denver 2002
- Leberl, F., Perko, M., Gruber, M., Ponticelli, M., 2002: Novel Concepts for Aerial Digital cameras, ISPRS Com I, Denver 2002, ISPRS Archive Vol. 34 Part 1
- Oswald, H.C., 2006: Potential digitaler photogramm-metrischer Luftbildkameras, Diploma thesis Leibniz University Hannover 2006

# - Modelldeformationen -Zur geometrischen Genauigkeit digitaler Luftbildkameras

#### VOLKER SPRECKELS<sup>1</sup>, ANDREAS SCHLIENKAMP<sup>2</sup> & KARSTEN JACOBSEN<sup>3</sup>

Zusammenfassung: Die Deutsche Steinkohle AG (DSK) ist verpflichtet, die Auswirkungen des untertägigen Steinkohlenabbaus an der Tagesoberfläche zu überwachen, zu analysieren und zu dokumentieren. Großflächige Veränderungen, die durch bergbaubedingte Bodenbewegungen z.B. für den Grundwasserflurabstand und an Oberflächengewässern entstehen, müssen reguliert bzw. kompensiert werden. Für diese Bereiche mit Größen von 100 km<sup>2</sup> bis 200 km<sup>2</sup> müssen zeitnah hochgenaue Digitale Geländemodelle (DGM) erstellt werden. Die Anforderungen an die Höhengenauigkeit sind mit  $\pm 10$ cm festgelegt. Diese Genauigkeit konnte mit analogen Luftbildkammern, Kammerkonstante  $c_k=15$ cm, Bildmaßstab 1:4000, 80% Längsüberdeckung, hoher Passpunktdichte, automatischer DHM-Berechnung und manueller Nachbearbeitung an Digitalen Stereoauswertestationen stets eingehalten werden. Großformatige Digitale Luftbildkameras wie die Intergraph DMC und Vexcel UltraCamD ersetzen verstärkt die bewährten analogen photogrammetrischen Luftbildkammern. DSK entschied sich für Befliegungen mit der Vexcel UltraCamD, da nur diese die Befliegung von 80% Längsüberdeckung bei einer Bodenauflösung von ca. 10 cm GSD und einer Höhengenauigkeit von ca.  $\pm 8$  bis  $\pm 9$  cm erlaubte. DSK ließ bereits drei Befliegungen mit der Vexcel UltraCamD durchführen: im Dezember 2004 eine Befliegung zur Ableitung von Planungsgrundlagen für eine Kokerei, im August 2005 eine Testbefliegung über ca. 20 km<sup>2</sup>, um die Eignung der multispektralen Bilder für forstkundliche Auswertungen in CIR-Bildern zu testen und im März 2006 zur DGM-Erstellung für einen 120 km² großen Bergwerksbereich im Saarrevier, gestützt auf 185 signalisierte Passpunkte.

DSK bemerkte bei der Stereoauswertung, dass bei der für alle Befliegungen eingesetzten UltraCamD Nummer 8 große Höhendifferenzen von bis zu 25cm in benachbarten 60% Stereomodellen auftraten. Untersuchungen der DSK und des Instituts für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen der Leibniz Universität Hannover (IPI) zeigten große systematische Bildfehler auf, welche zu großen Modelldeformationen im Digitalen Höhenmodell (DHM) führten. Mit dem in Hannover entwickelten Programm DEMCOR können die systematischen Bildfehler erfasst und kompensiert werden, die Entzerrung der Bilddaten für die nachfolgende photogrammetrische Auswertung an Digitalen Stereo-Auswertestationen erfolgt über das Programm IMGEO. Der Beitrag zeigt die Differenzen der UltraCamD DHM zueinander und zu analogen DHM (RMK TOP 15). Weitere Untersuchungen zu systematischen Bildfehlern der Digitalen Kameras DMC und UltraCamD über mehrere Befliegungsblöcke werden bei JACOBSEN 2007 vorgestellt.

Die vorliegenden Untersuchungen beziehen sich <u>nicht</u> auf die aktuellsten Versionen der UltraCamD und der DMC Prozessierungs-Software. In der Zwischenzeit haben Vexcel und Intergraph Kameras und Datenprozessierung modifiziert. Die hier vorgestellten geometrischen Probleme existieren auch für die analogen Reihenmesskammern, werden aber im Allgemeinen ignoriert.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Volker Spreckels, Deutsche Steinkohle AG (DSK), Geschäftsbereich Geoinformation/Vermessung (BG G), BG G1 -Photogrammetrie, Shamrockring 1, 44623 Herne, e-mail: <u>volker.spreckels@dsk.de</u>

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Andreas Schlienkamp, Deutsche Steinkohle AG (DSK), Geschäftsb. Geoinformation/Vermessung (BG G), BG G1 -Photogrammetrie, Shamrockring 1, 44623 Herne, e-mail: <u>andreas.schlienkamp@dsk.de</u>

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Dr.- Ing. Karsten Jacobsen, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI), Leibniz Universität Hannover, Nienburger Strasse 1, 30169 Hannover, e-mail: <u>jacobsen@ipi.uni-hannover.de</u>

#### 1 Einleitung

Bereits bei der Stereoauswertung der Kokerei Prosper 2004 [SPRECKELS, et. al. 2005] fielen Spannungen in den 60%-Stereomodellen zu den benachbarten Modellen auf, die Auswertung erfolgte daraufhin in den zentralen Bereichen der 40%-Modelle - aus Zeitgründen konnte dieses Phänomen allerdings nicht weiter verfolgt werden.

Bei der Auswertung des Bildfluges 2006 der DSK im Saarrevier (DSK-Saar) traten bei der Stereo-Auswertung ähnlich hohe Abweichungen in den benachbarten Modellen auf, woraufhin wieder in den zentralen Bereichen der 40%-Modelle ausgewertet wurde. Die Befliegung mit 80% Überlappung erlaubte die Berechnung von DHM aus 60%-Modellen der geraden und der ungeraden Bildnummern. Die Differenzen dieser DHM wurden gebildet und zeigten Höhenunterscheide im Bereich von -30 cm bis +40 cm zueinander. Auch die Vergleiche zu den 40%-DHM wiesen weiterhin große Höhendifferenzen auf. Im Vergleich zu einem analogen Bildflug aus dem Jahr 2005 konnte gezeigt werden, dass die Höhendifferenzen aus den systematischen Bildfehlern der UltraCamD herrühren, die zu großen Modelldeformationen führen. Es muss zudem gesagt werden, dass die systematischen Bildfehler nicht mit der bei DSK eingesetzten Produktschiene erkannt wurden, sondern erst bei Kontrollrechnungen mit BLUH.

#### 2 Digitaler Bildflug "DSK-Saar 2006"

Am 02. und am 03. März 2006 erfolgte der Bildflug mit der Vexcel UltraCamD Nr. 8 für den Bereich eines Bergwerkes im Saarrevier über 120 km<sup>2</sup>. Der Bildflug wurde mit 80% Längs- und 35% Querüberdeckung geplant, die Lage der Projektionszentren wurde mit dGPS-IMU registriert. Es wurden 31 Flugstreifen geflogen und insgesamt 2800 digitale Luftbilder aufgezeichnet (Abbildung 1).



Abbildung 1: UltraCamD Flugkampagne "DSK-Saar 2006". Übersicht über die Lage der Projektionszentren und der Passpunkte.

Die Bodenauflösung (Ground Sampling Distance, GSD) lag für diese Mittelgebirgsregion, abhängig von der Flughöhe über Grund, zwischen 8cm und 11cm. Der Bildflug wurde auf 185 Passpunkte gestützt (Abbildung 1), die über dGPS mit einer Genauigkeit in Lage und Höhe von kleiner ±3cm eingemessen wurden. Die Anforderung an die Höhengenauigkeit für das zu erstellende Digitale Geländemodell (DGM) beträgt ±10cm.

#### 3 Datenaufbereitung

Bei DSK erfolgte die Datenprozessierung mit dem Vexcel Programm OPC, Version 2.1.3. anschließend die Aerotriangulation (AT), ein automatisches DHM Matching und abschließend die manuelle photogrammetrische Bruchkantenbestimmung in den Stereobildern. Weiterhin lagen terrestrische Gewässermessungen zur Einarbeitung in das DGM vor. Die photogrammetrische Auswertung an der Stereo-Auswertestation zeigte für benachbarte 60% Stereomodelle Höhenabweichungen im Anschluss der Messelemente von bis zu 25cm. Diese Differenzen traten auch in den Stereomessungen des Bildfluges 2004 zur Erstellung von Lageplänen für eine Kokerei auf. Aus Zeitgründen konnten auch dieses Mal nicht die Ursachen für diese Differenzen gesucht werden. Die Auswertung erfolgte, ebenso wie im Jahr 2004, in den zentralen Bildbereichen der 40% Modelle, die einen recht guten Höhenanschluss der Messelemente zeigten.

Erst im Nachhinein konnten Untersuchungen der Effekte in den DHM bei DSK erfolgen. Da die Längsüberdeckung dieses Bildfluges 80% betrug, konnten aus den Bilddaten zwei DHM mit 60% Längsüberdeckung gerechnet werden, zum einen ein DHM aus den Luftbildern mit gerader, zum anderen ein DHM aus den Bildern mit ungerader Bildnummer. Ein Jahr zuvor, im Jahr 2005, erfolgte ein analoger Bildflug für einen Schacht des Bergwerkes, der im Bildflugbereich DSK-Saar 2006 liegt (s. Abb. 2).



Abbildung 2: Orthophotos und Lage der Stereomodelle: UltraCamD 2006, 80% Längsüberdeckung (links). Orthophoto RMK TOP 15, 2005 (rechts).

Der analoge Bildflug erfolgte mit einer RMK TOP 15 im Bildmaßstab 1:4000 als Einzelstreifen (Nord-Süd Ausrichtung), mit 80% Längsüberdeckung, sodass auch hier zwei 60% DHM berechnet werden konnten und ein unabhängiger DHM-Vergleich bei etwa gleicher Höhenmessgenauigkeit möglich ist.

#### 4 Vergleich der Digitalen Höhenmodelle

Die UltraCamD DHM wurden für Überdeckungen von 40%, 60% gerade, 60% ungerade Bildnummern und 80% erstellt und untereinander, sowie mit den analogen RMK TOP 15 DHM (40%, 60% ungerade und 60% gerade Bildnummern, 80%) verglichen (s. Abb. 3). Diese DHM haben in etwa gleiche theoretische Höhenmessgenauigkeiten.



Abbildung 3: DHM – Übersicht: UltraCamD DHM (linkes Bild): 80% Längsüberdeckung (oben), 60% DHM gerade Bild-Nr. (Mitte links), 60%DHM ungerade Bild-Nr. (Mitte rechts), 40% DHM (unten); RMK TOP 15 DHM (rechtes Bild): 80% Längsüberdeckung (oben), 60% DHM gerade Bild-Nr. (Mitte links), 60%DHM ungerade Bild-Nr. (Mitte rechts), 40% DHM (unten). Die Abbildungen zeigen identische Bildbereiche.

Der Vergleich der DHM zeigte Höhendifferenzen von bis zu ±35cm, dem Drei- bis Vierfachen der zugrunde gelegten theoretischen Höhenmessgenauigkeit von ±8cm bis ±9cm.

Um Orientierungsunsicherheiten ausschließen zu können, erfolgte das Matching der DHM mit und ohne die Berücksichtigung der IMU Daten. Die Ergebnisse zeigten einen vernachlässigbar geringen Einfluss der IMU Daten auf die DHM Differenzen. Nachfolgend wurden Einflüsse der Parameter zur Aerotriangulation auf die DHM-Differenzen untersucht. DSK erreichte in der Bündelblockausgleichung ein Sigma0 von 2.6µm. Diese DHM-Differenzen zeigt Abbildung 4, links. Der Hersteller der Aerotriangulations-Software wurde mit diesen systematischen Bildfehlern konfrontiert und führte eine eigene AT und Bündelblockausgleichung durch. Das Sigma0 erfuhr zwar eine Verbesserung auf 1,9µm, die systematischen Effekte in den DHM-Differenzen stiegen allerdings um ca.  $\pm 10$ cm (s. Abb. 4, rechts). Die Software enthält keine Möglichkeit zur Berechnung einer Selbstkalibrierung.



Abbildung 4: UltraCamD – 60% DHM Differenzen (ungerade minus gerade Bildnummern). Farbcodierte DHM-Differenzen [cm] und Höhenprofile für Sigma0=2,6µm (links) und für Sigma0=1,9µm (rechts).

Als nächstes wurden die DHM der UltraCamD mit den DHM der analogen Reihenmeßkammer RMK TOP 15 verglichen. Um sicher gehen zu können, dass der analoge Bildflug keine systematischen Bildfehler enthält oder Unregelmäßigkeiten des Luftbildscanners zu Höhensprüngen im DHM führen, wurden die 60% DHM aus ungeraden und geraden Bildnummern miteinander verglichen. Die Differenz dieser beiden DHM liegt innerhalb von  $\pm 10$ cm (s. Abb. 5, links), so dass ein unabhängiger Vergleich mit diesen DHM möglich ist. Die

systematischen Bildfehler spiegeln sich neben einem Höhen-Offset von etwa 25cm in der Differenz der UltraCamD und der RMK TOP 15 DHM wieder, so dass die systematischen Effekte eindeutig auf den systematischen Bildfehlern der UltraCamD beruhen (s. Abb. 5, rechts.).



Abbildung 5: Farbcodierte DHM-Differenzen [cm] und Höhenprofile für RMK TOP 15 – 60% DHM Differenzen, ungerade minus gerade Bildnummern (links). 60% DHM-Differenzen RMK TOP 15 zu UltraCamD (rechts).

### 5 Detaillierte Analyse der Digitalen Höhenmodelle mit BLUH

Zur Kontrolle der bei DSK gefundenen systematischen Effekte wurde der Block "DSK-Saar" mit dem Programmsystem BLUH ausgewertet. JACOBSEN 2007 zeigt, dass sich die Teilkameras der digitalen Luftbildkameras durch die Temperatureinflüsse und den Luftdruck während des

Bildfluges ändern. Daraus folgt, dass ebenso wie bei analogen Luftbildern eine Blockausgleichung mit Selbstkalibrierung durch zusätzliche Parameter erfolgen muss (s. Abb. 6). Die Residuen, also die verbleibenden Bildkoordinatenfehler der Blockausgleichung enthalten Informationen über die systematischen Bildfehler (s. Abb. 7), oder korrekter, die Abweichung der tatsächlichen Bildgeometrie von dem mathematischen Modell der Zentralperspektive.



Abbildung 6: UltraCamD, Block DSK-Saar, 9cm GSD. Gemittelte Residuen ohne Selbstkalibrierung (links), mit Selbstkalibrierung mit den Parametern 1-12 (Mitte), mit Selbstkalibrierung mit den Parametern 1-12 und 42-73 (rechts).



Abbildung 7: UltraCamD, Block DSK-Saar, 9cm GSD. Systematische Bildfehler, Parameter 1-12 (links), Parameter 42-73 (Mitte), Parameter 1-12, 42-73 (rechts).

Die systematischen Anteile der Residuen sind durch zufällige Anteile überlagert, aus diesem Grund werden im hannoverschen Programmsystem BLUH die Residuen entsprechend ihrer Lage des zugehörigen Bildpunktes im Bildraum überlagert und in kleinen Teilflächen gemittelt.

Die normalen zusätzlichen Parameter, die auch für die Bearbeitung analoger Bilder benutzt werden, sind nicht in der Lage, diese speziellen geometrischen Situationen exakt zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wurden in das Programm BLUH spezielle zusätzliche Parameter für die DMC und die UltraCam eingeführt (Tabelle 1). Die speziellen Parameter berücksichtigen, dass die Teilbilder mit Hilfe von Verknüpfungspunkten zusammengeführt werden und somit Lücken innerhalb der virtuellen Bilder ausgeschlossen sind.

29 DMC - Exzentrizität der Projektionszentren 30-33 x' = x + P32\*(x<sup>2</sup>-32x) Synchronisation der DMC Teilbilder Orientierungsfehler DMC X 1 34 x' = x - x \* v \* P34 $\mathbf{y'} = \mathbf{v}$  $y' = y - x^*y^*P35$  Orientierungsfehler DMC Y 1 35  $\mathbf{x'} = \mathbf{x}$ 36 - 41 entsprechend 34 - 35 für andere Teilbilder 42 - 49 Maßstabsfehler für UltraCam-Teilbilder 50-57 Verschiebung in x für UltraCam-Teilbilder 58-65 Verschiebung in y für UltraCam-Teilbilder 66 - 73 Drehung UltraCam-Teilbilder 74 - 77 radialsymmetrische Verzeichnung der DMC-Teilbilder 78 einheitliche Änderung der Öffnungswinkel der DMC-Teilbilder 80 einheitliche radialsymmetrische Verzeichnung der DMC-Teilbilder

Tabelle 1: Spezielle zusätzliche Parameter für die DMC und die UltraCam.

Die kameraspezifischen zusätzlichen Parameter können mit den 12 Standardparametern (Parameter 1-12) des Programms BLUH kombiniert werden. Das Programm BLUH entfernt alle nicht signifikanten und zu hoch korrelierten Parameter von der Ausgleichung, so dass die letzte Iteration nur mit den sinnvollen zusätzlichen Parametern durchgeführt wird. Über beide Flugtage hinweg sind die Differenzen der systematischen Bildfehler vernachlässigbar gering, die Geometrie der Kamera ist also stabil geblieben (s. Abb. 8).



Abbildung 8: UltraCamD, Block DSK-Saar, 9cm GSD. Systematische Bildfehler: erster Flugtag (links), zweiter Flugtag (Mitte), Differenz 1. Tag – 2.Tag (rechts).

Die Standardabweichung der Gewichtseinheit (Bildkoordinatengenauigkeit) liegt für die UltraCamD zwischen 2,3µm und 3,0µm und damit in einem Bereich, der mit analogen Bildern nicht erreichbar ist. Die Genauigkeit der Ausgleichung wurde mit unabhängigen Vergleichspunkten bestimmt. Diese Methode ist zwar von der Objektkoordinatengenauigkeit abhängig, jedoch nicht wie die innere Genauigkeit einer Blockausgleichung von nicht erfassten systematischen Fehlern. Durch die Selbstkalibrierung verbessert sich besonders die Höhengenauigkeit, während sich die Lagegenauigkeit durch die zusätzlichen Parameter bei der UltraCamD um 18% verbessert. Die erzielten Lagegenauigkeiten liegen zwischen 0.25 und 0.32 der Objektpixelgröße.

### 6 Modelldeformationen

Die Berücksichtigung der durch Selbstkalibrierung bestimmten systematischen Bildfehler in der Blockausgleichung ist unproblematisch. Anders sieht es bei der anschließenden Modellauswertung aus, da normalerweise die systematischen Bildfehler nicht in den photogrammetrischen Stereo-Auswertestationen berücksichtigt werden können, was zu Modelldeformationen führt. In der Lage ist die Auswirkung in der Regel vernachlässigbar, nicht jedoch in der Höhe wie Abbildung 9 zeigt. Die erwartete, theoretische Höhenauswertegenauigkeit liegt im Block "DSK-Saar" bei SZ=9,2cm.



Abbildung 9: Modelldeformationen durch systematische Bildfehler: UltraCamD, Block DSK-Saar, 9cm GSD. 66,3% Längsüberdeckung, h/b=4,4, Parameter 1-12 (links außen) und 1-12, 42-73 (Mitte links). 49,5% Längsüberdeckung, h/b=2,9, Parameter 1-12 (Mitte rechts) und 1-12, 42-73 (rechts außen). 5cm – Isolinien.

Damit die Bilddaten an der Stereoauswertestation genutzt werden können, muss unbedingt eine Korrektur der Bildgeometrie durch die Anpassung der systematischen Bildfehler erfolgen, z.B. mit dem hannoverschen Programm IMGEO. Mit diesen Bilddaten kann dann ein erneutes DHM

Matching erfolgen, oder aber eine a posteriori Korrektur der Höhenmodelle, z.B. mit dem Programm DEMCOR.

#### 7 Zusammenfassung und Ausblick

Digitale Luftbildflächenkameras wie die Intergraph DMC und die Vexcel UltraCam setzen sich immer stärker für die Kartenerstellung durch. Ihre Bildqualität ist besser als die der analogen Luftbilder und es zeigte sich, dass der Informationsgehalt einer einzelnen Aufnahme auch größer ist als der eines analogen Luftbildes. Außerdem können die digitalen Kameras auch noch unter ungünstigen Lichtverhältnissen eingesetzt werden, wie die photogrammetrische Auswertung der UltraCamD Flugkampagne im Dezember 2004 zeigte [SPRECKELS, et. al. 2005].

Die mit den digitalen Kameras erzielten Genauigkeiten sind besser als jene, die mit den analogen Aufnahmen erreicht werden können. Es sind jedoch bei beiden Gruppen systematische Bildfehler vorhanden, die eine Blockausgleichung mit Selbstkalibrierung erfordern. Es konnte bereits allein mit den allgemeinen zusätzlichen Parametern, die auch für analoge Bilder eingesetzt werden, fast der beste Genauigkeitsbereich erreicht werden. Die speziellen zusätzlichen Parameter für die Digitalen Luftbildkameras führten nur zu einer geringfügigen Genauigkeitssteigerung.

Wie bei den analogen Luftbildern sind Modelldeformationen vorhanden, welche, wenn sie nicht berücksichtigt werden, einen großen Einfluss auf die Höhenauswertung haben. Bei den analogen Luftbildkameras wurde das bislang normalerweise ignoriert. Zurzeit können die Einflüsse der systematischen Bildfehler nur durch zusätzliche Programme korrigiert werden. Im vorliegenden Fall für bereits bestehende DHM a posteriori mit dem Programm DEMCOR. Damit eine akkurate Stereoauswertung gewährleistet werden kann, muss derzeit noch eine Korrektur der Bilddaten erfolgen, z.B. mit dem Programm IMGEO. Aus diesen entzerrten Bilddaten können dann DHM im Bereich der erwarteten, theoretischen Höhengenauigkeit berechnet werden.

Sowohl Intergraph als auch Vexcel arbeiten zurzeit an verbesserten Kalibrierungsverfahren um die systematischen Fehler auf ein vernachlässigbares Maß zu verkleinern.

#### 8 Literatur

- JACOBSEN, K., 2007 : Potential großformatiger digitaler Luftbildkameras. In: Publikationen der DGPF, Tagungsband 16, 2007, Gemeinsame Jahrestagung der SGPBF, DGPF und OVG, 19.-21. Juni 2007, Muttenz/Basel, Schweiz.
- SPRECKELS, V, SCHLIENKAMP, A. & SYREK, L.:. (2005): Photogrammetric Stereoplotting Capabilities of Vexcel UltraCamD Digital Aerial Imagery. In: ISPRS Hannover Workshop 2005 "High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information", 17.-20. Mai 2005, Hannover, Deutschland. Auf CD-ROM.

# Softwaregestützte Kompensation temperaturabhängiger Bilddeformationen für die Vexcel UltraCam

#### RICHARD LADSTÄDTER<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Die digitale Luftbildkamera UltraCam<sub>DX</sub> von Vexcel basiert auf einem Multi-Sensor-Konzept, d.h. das hoch auflösende panchromatische Luftbild wird aus den Teilbildern der insgesamt neun Sensoren zusammengesetzt. Durch die Laborkalibrierung der Kamera wird die Lage der einzelnen Sensoren in jedem der vier Kameraköpfe exakt bestimmt. Treten jedoch in der Kamera während des Fluges größere Temperaturunterschiede im Vergleich zur Laborkalibrierung auf, dann kommt es zu merkbaren Veränderungen der Sensorpositionen (Sensordrift). Werden diese bei der späteren Bildprozessierung nicht berücksichtigt, dann führt dies zu systematischen Deformationen der Bildgeometrie.

Durch ein einfaches Korrekturmodell (TDM: Temperature Dependent Model) können diese temperaturabhängigen Bilddeformationen während der Bildprozessierung erkannt und kompensiert werden. Die Funktionsweise der TDM-Bildkorrektur wird anhand eines Beispielprojektes gezeigt. Es zeigt sich, dass der Großteil der Bilddeformationen durch diese symmetrisch wirkende Bildkorrektur innerhalb der Bildprozessierungssoftware OPC eliminiert werden kann. Die verbleibenden (asymmetrischen) Fehleranteile sind i.a. sehr klein und können überdies durch den Ansatz von speziell auf die UltraCam zugeschnittenen Selbstkalibrierungs-Parametern im Biindelausgleich nachträglich eliminiert werden.

## 1 Einleitung

Dieser Beitrag beschreibt ein Verfahren zur Korrektur temperaturabhängiger Einflüsse auf die Bildgeometrie der digitalen Luftbildkamera Vexcel  $UltraCam_{D/X}$ , das im Auftrag von Microsoft Vexcel an der TU Graz entwickelt wurde. Die als "Temperature Dependent Model" (TDM) bezeichnete Korrektur findet während der Bildprozessierung mit der firmeneigenen Software OPC ("Office Processing Center") statt und ist in der aktuellen OPC-Version 3.0 nun für beide Kameramodelle verfügbar. TDM ist im Zusammenhang mit einer früher erfolgten Laborkalibrierung und einer später im Bündelausgleich durchzuführenden Selbstkalibrierung zu sehen, sodass sich innerhalb des photogrammetrischen Workflows ein dreistufiger Prozess ergibt (vgl. Abbildung 1):

- 1) Kalibrierung der Kamera im Labor, Definition eines Kamera-Koordinatensystems.
- 2) Wiederherstellung des Kamerakoordinatensystems individuell für jedes Bild eines AT-Projekts.
- 3) Kompensation kleiner, systematischer Fehleranteile durch Selbstkalibrierung im Bündelausgleich.

Im ersten Schritt wird innerhalb der Kamera ein dreidimensionales, kartesisches Koordinatensystem definiert, das physikalisch durch die kalibrierte Brennweite, den Hauptpunkt und durch die Rahmenmarken (analoge Kamera) bzw. durch die Pixelmatrix der CCD-Sensoren (digitale Kamera) definiert ist (KRÖPFL, M., KRUCK, E. & GRUBER, M., 2004).

Im zweiten Schritt wird dieses Kamerakoordinatensystem aus der Labor-Kalibrierung für ein aus einer realen Befliegung stammendes Bild rekonstruiert. Im analogen Fall geschieht dies z.B. durch Messung der Rahmenmarken im Bild ("Innere Orientierung"). Bei einer großformatigen, digitalen Luftbildkamera ist zwar die Bildgeometrie innerhalb eines Sensors

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> TU Graz, Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie, Steyrergasse 30/I, 8010 Graz.

stabil, jedoch nicht innerhalb des gesamten Bildes, das aus den Bildern mehrerer Sensoren zusammengesetzt ist. Im speziellen Fall der *Vexcel UltraCam* kann sich die Position der einzelnen Sensoren im Kamerakoordinatensystem durch thermische Ausdehnung der Aluminiumträgers verändern ("Sensordrift"), was bei der Bildprozessierung durch die TDM-Korrektur wieder kompensiert werden muss.

Der letzte Schritt der Kamera-Kalibrierung findet erst im Bündelausgleich statt, bei dem alle Bilder des Projekts gemeinsam verarbeitet werden. Durch die große Überbestimmung lassen sich noch sehr kleine ( $<2\mu$ m), aber systematische Fehleranteile bestimmen, die einerseits aus Restfehlern der Labor-Kalibrierung bzw. TDM-Korrektur stammen und andererseits auch durch Abweichung des mathematischen Modells von der Realität verursacht werden können (z.B. Refraktion). Für die *UltraCam* wurde dazu ein spezieller Satz von zusätzlichen Parametern in der Bündelausgleich-Software BINGO entwickelt (vgl. GRUBER, M. & LADSTÄDTER, R., 2006).



Abbildung 1: Die drei Stufen der Kamerakalibrierung im photogrammetrischen Workflow der UltraCam.

Um die rohen Bilddaten der Kamera (Level00) in ein geometrisch korrektes Level02-Bild umzurechnen, müssen die Kalibrierdaten (GeoCalibParam) der Laborkalibrierung zur Verfügung stehen. Diese Daten sind aber nur für die Kalibriertemperatur  $T_0$  gültig. In der TDM-Korrektur wird daher beim Zusammensetzen jedes einzelnen Bildes eine individuelle Abweichung *dC* von der Kalibriertemperatur berechnet. Anhand eines physikalischen Modells werden dann Korrekturwerte für die Sensorpositionen berechnet und daraus eine modifizierte Kalibrierung GeoCalibParam(t) für dieses Bild abgeleitet.

Durch diesen Schritt gelingt es, systematische Bildfehler, die durch variable Temperaturverhältnisse innerhalb der *UltraCam* entstehen, zu kompensieren. Größere Abweichungen treten insbesondere dann auf, wenn sich die Kamera in größeren Flughöhen abkühlt oder bei höheren Außentemperaturen durch den Betrieb stark aufheizt. Auch wenn die Temperatur im Flugbetrieb nahezu konstant bleibt kann sie signifikant von jener Betriebstemperatur abweichen, bei der die Kamera im Labor kalibriert wurde.

Die folgenden Abschnitte beschreiben im Detail das physikalische Modell der Sensordrift und die daraus ableitbare temperaturabhängige Korrektur der Kamerakalibrierung. Im Abschnitt 4 wird anhand eines Beispielprojektes exemplarisch gezeigt, dass das entwickelte Korrekturverfahren systematische Bildfehler nahezu vollständig unterdrücken kann.

## 2 Physikalisches Modell der Sensordrift

Die insgesamt 13 CCD Sensoren, die auf die vier Kameraköpfe (Konus 0-3) des PAN-Kanals verteilt sind, sind mit Hilfe von drei Passstiften auf einem Aluminium-Träger montiert, wobei

nur einer dieser drei Stifte eine starre Verbindung zwischen CCD und Aluminiumträger herstellt (vgl. Abbildung 2). Da die Materialeigenschaften von Aluminium und die Kamerageometrie bekannt sind, kann die zentrische Ausdehnung der Aluminiumträger und die damit verbundene Verschiebung der einzelnen Sensoren in Abhängigkeit von einer Temperatur-Abweichung dC (relativ zur Temperatur  $T_0$  der Laborkalibrierung) beschrieben werden.



Abbildung 2: Positionen der Befestigungspunkte der einzelnen Sensoren für Konus 0 – 3 (UltraCam<sub>D</sub>)

Ausdehnungskoeffizienten: Aluminium: 23ppm/C°; Silizium: 3ppm/C.

Die Verschiebungen der einzelnen Sensoren können aus der Distanz des "fixen" Passstiftes zum Mittelpunkt des Aluminiumträgers und dem resultierenden Ausdehnungskoeffizienten (20ppm/C°) geschätzt werden. Die folgende Tabelle fasst die Sensor-Verschiebungen im Level02-System bei einer angenommenen Temperaturabweichung von  $+1^{\circ}C$  zusammen:

		UCD		UCX						_
Layer	CCD	dx [µm]	dy [µm]	dx [µm]	dy [µm]		0.0		0.1	
00	00	-0.08	-0.53	-0.09	-0.54		00	10	01	
00	01	+1.28	-0.53	+1.29	-0.54	ion				-
00	02	-0.08	+0.35	-0.09	+0.36	irect	20	30	21	-
00	03	+1.28	+0.35	+1.29	+0.36	ht d				
01	10	+0.60	-0.53	+0.60	-0.54	Flig				
01	11	+0.60	+0.35	+0.60	+0.36		02	11	03	
02	20	-0.08	-0.09	-0.09	-0.09	Ļ				
02	21	+1.28	-0.09	+1.29	-0.09			Ŧ		_
03	30	+0.60	-0.09	+0.60	-0.09			У		

Tab. 1: Korrekturtabelle für eine Temperaturabweichung dC=+1C° (im Lvl02 Koordinatensystem)

Bei einer Temperaturabweichung von  $+10^{\circ}C$  ergeben sich also maximale Verschiebungen von fast  $13\mu m$  (CCD 00-03 und CCD 00-01), das entspricht beinahe der Größe zweier Pixel bei der *UltraCam<sub>X</sub>* (7.2 $\mu m$ ). An dieser Größenordnung lässt sich bereits erkennen, dass eine entsprechende temperaturabhängige Korrektur unbedingt notwendig ist.
# 3 Das temperaturabhängige Korrekturmodell

### 3.1 Auswirkungen auf die Bildgeometrie

Beim Zusammensetzen ("Stitching") des PAN-Bildes werden die Teilbilder (Layer) von Konus 1, 2 und 3 mit Hilfe von Verknüpfungspunkten in den überlappenden Bildbereichen in das Bild des Masterkonus "eingehängt". Der Masterkonus besitzt vier Sensoren, die in den Bildecken angeordnet sind und die damit wesentlich die Geometrie (Größe) des Gesamtbildes bestimmen. Betrachtet man nun z.B. die Einpassung vom Layer 1 auf den Masterkonus (Layer 0), dann erkennt man folgendes:

- Ein Auseinanderdriften der Sensoren im Masterkonus in x-Richtung muss bei der Einpassung durch einen entsprechenden Maßstabs-Parameter S<sub>x1</sub> < 1.0 kompensiert werden<sup>2</sup>, der Maßstab in y-Richtung wird davon nicht beeinflusst (S<sub>v1</sub> bleibt also 1.0).
- 2) Das Auseinanderdriften der Sensoren im Masterkonus in y-Richtung führt zu keinen Verzerrungen bei der Einpassung, solange die Temperaturunterschiede zwischen Konus 0 und Konus 1 klein sind.



Abbildung 3: Einpassung von Layer 1 auf Layer 0: Maßstäbliche Verzerrung von Layer 1 in x-Richtung

Dasselbe Prinzip gilt für die Einpassung vom Layer 2 auf den Masterkonus, nur sind hier die Rollen der x- bzw. y-Komponente vertauscht. Eine temperaturbedingte Verschiebung der Sensoren wirkt sich also wie folgt auf die Bildgeometrie aus:

- 1) Die absolute Lage der Teilbilder im Masterkonus ist verfälscht, d.h. Abstände zwischen Punkten in den vier Bildecken sind zu groß bzw. zu klein.
- 2) Die Bildbereiche von Layer 1 und 2, die auf den Masterkonus eingepasst wurden, sind in x- bzw. y-Richtung verzerrt. Diese Verzerrungen sind an der Abweichung der Maßstabsfaktoren S<sub>x1</sub> (Layer 1) bzw. S<sub>y2</sub> (Layer 2) vom Wert 1.0 erkennbar.
- 3) Der zentrale Bildbereich wird durch den Layer 3 abgedeckt, der zuletzt auf die bereits transformierten Layer 1 und 2 eingepasst wird. Der Maßstabsfaktor S<sub>x3</sub> wird daher im Wesentlichen vom Layer 1 übernommen, S<sub>y3</sub> vom Layer 2. Der zentrale Bildbereich wird daher in beide Richtungen annähernd gleich verzerrt.
- 4) Durch die asymmetrische Anordnung der Fixierstifte ergibt sich eine asymmetrische Verschiebung aller Sensoren bezüglich der Bildmitte. Der kalibrierte Hauptpunkt wird daher ebenfalls verschoben (um -0.6µm/+0.09µm pro °C in x- bzw. y-Richtung).

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Ein Auseinanderdriften der Sensoren bei positiver Temperaturabweichung führt zu einem Zusammenrücken der Bilder dieser Sensoren!



Abbildung 4: (a) Auswirkung der Sensordrift auf die Bildgeometrie für dC=+10°C. (b) Überlagerung der Sensordrift mit dem Bildmaßstab aufgrund einer veränderten Brennweite (rechts).

#### 3.2 Schätzung der Temperaturabweichung

Wie bereits oben gezeigt wurde entsteht durch die Relativverschiebung zweier Sensoren im Masterkonus ein Maßstabsfaktor  $S_{x1}$  bzw.  $S_{y2}$  bei der Einpassung von Layer1 bzw. Layer2. Die Relativverschiebung bei einer Temperaturabweichung  $dC=+1^{\circ}C$  kann aus der Tabelle 1 entnommen werden. Da die Distanz zwischen den Stitching-Zonen genau bekannt ist, lässt sich der beim Einpassen auftretende Maßstabsfaktor als Funktion von dC angeben:

$$S_{x1} = 1 - (0.00138 / 34.25) \cdot dC$$
  $S_{y2} = 1 - (0.00090 / 22.30) \cdot dC$  eq. 1 (gilt für die UCX)

Durch Umkehrung der obigen Formel lässt sich also die Temperaturabweichung *dC* aus den aufgetretenen Maßstabsfaktoren  $S_{x1}$  bzw.  $S_{y2}$  sehr genau schätzen. Da die Anzahl und Qualität der in den Überlappungsbereichen gefundenen Verknüpfungspunkte unterschiedlich sein kann, weichen die aus den Maßstabsfaktoren  $S_{x1}$  bzw.  $S_{y2}$  berechneten Temperaturabweichungen *dC* geringfügig voneinander ab<sup>3</sup>. Für eine möglichst robuste Schätzung werden daher die beiden Maßstabsfaktoren  $S_{x1}$  und  $S_{y2}$  gemittelt:

$$dC = (1 - (S_{x1} + S_{y2})/2) \cdot 24800$$
 eq. 2 (gilt für die UCX)

Da diese Schätzung unabhängig für jedes Bild durchgeführt wird ist ein gewisses "Rauschen" der geschätzten Temperaturabweichung dC unvermeidbar (vgl. Abbildung 7a). Ein Vergleich mit der über die Temperatursensoren ermittelten Sensortemperaturen bzw. der Umgebungstemperatur in der Kamera erfolgt in der aktuellen OPC-Version 3.0 (noch) nicht.

### 3.3 Modifizierter Stitching-Prozess

Die Prozessierung der *UltraCam* Level00 Bilddaten auf Level02 erfolgt mit der OPC-Software, in die die temperaturabhängige Bildkorrektur (TDM) vollständig integriert wurde (s. Abb. 5). Zu diesem Zweck wird das Stitching für jedes Bild nun zweifach durchlaufen:

- 1) Mit den im Labor bestimmten Sensorpositionen (Kamerakalibrierung).
- 2) Nach der Schätzung von dC und der Berechnung der Sensordrift mit den korrigierten Sensorpositionen.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Es gibt noch weitere Störeinflüsse wie z.B. kleine Temperaturdifferenzen in den einzelnen Kameraköpfen.



Abbildung 5: Implementierung der TDM-Korrektur innerhalb der OPC-Software (ab Version 2.2.0)

### 3.4 Korrektur der Brennweite

Durch den modifizierten Stitching-Prozess wurde ein geometrisch korrektes PAN-Bild mit dem ursprünglichen, kalibrierten Hauptpunkt wiederhergestellt. Durch einen Temperaturunterschied dC wird aber auch die dritte Dimension der Kamera, d.h. die Brennweite c beeinflusst. Eine Änderung der Brennweite wirkt sich als globaler Bildmaßstab aus, d.h. das gesamte Bild wird kleiner bzw. größer. Diese Veränderung führt zu keinen Spannungen beim Stitching und kann daher auch nicht direkt gemessen werden.

Nimmt man nun vereinfacht an, dass die in der Bildebene festgestellte Temperaturabweichung dC auch in z-Richtung wirkt, dann lässt sich die Änderung der Brennweite wieder direkt aus dem Ausdehnungskoeffizienten für Aluminium (23ppm/ $C^\circ$ ) ableiten. Die damit verbundene Maßstabsänderung des Bildes muss durch einen Korrekturmaßstab *m* wieder rückgängig gemacht werden:

$$m = 1 + 23 \cdot 10^{-6} \cdot dC$$
 eq. 1 (gleich für UCD und UCX)

Mit diesem Korrekturmaßstab wird das zusammengesetzte PAN-Bild nachträglich korrigiert. Die Korrektur wirkt jener beim Stitching entgegen, d.h. bei positivem dC werden die Sensoren nach außen verschoben und das Bild vergrößert. Die ebenfalls vergrößerte Brennweite muss durch einen Korrekturmaßstab m < 1.0 kompensiert werden (das Bild wird verkleinert). Die beiden Korrekturen heben sich aber keineswegs auf, wie man an der Auswirkung der überlagerten Korrekturen auf das Bild erkennen kann (vgl. Abbildung 4b).

## 4. Beispielprojekt "Testflug Gleisdorf"

Das Testgebiet Gleisdorf (20km östlich von Graz) wurde am 22. Februar 2007 mit einer  $UltraCam_X$  in zwei Flughöhen (1400m bzw. 3400m über Grund) beflogen. Die Prozessierung der Bilddaten erfolgte zweifach mit OPC v3.0 (mit bzw. ohne TDM-Korrektur). Ohne TDM-Korrektur weichen die Maßstabsfaktoren Sx<sub>1/3</sub> signifikant von 1.0 ab und steigen ab dem Bild

#450 (Beginn des hohen Fluges) weiter an (vgl. Abb. 6a). Bei der Prozessierung mit aktiver TDM-Korrektur sind die Maßstabsfaktoren hingegen nahezu konstant und weichen nur wenig von Eins ab (vgl. Abb. 6b).



Abbildung 6: Maßstabsfaktoren aus dem Stitching von Layer 1-3 (a) ohne TDM, (b) mit TDM-Korrektur

Die für jedes Bild individuell geschätzte Temperaturdifferenz dC ist in Abbildung 7a dargestellt. Nach einer kurzen Abkühlungsphase bleibt die Temperatur nahezu konstant auf ca. 10 °C unter der Kalibriertemperatur, um dann im hohen Flug um weitere 8 °C abzukühlen.



Abbildung 7: Geschätzte Temperaturabweichung (a) und davon abgeleitete Sensordrift (b)

Die aus *dC* berechneten Korrekturwerte der Sensordrift betragen quer zur Flugrichtung bis zu  $-12\mu m$  im niedrigen und bis zu  $-23\mu m$  im hohen Flug (vgl. Abb. 7b). Nach einer automatisierten Aerotriangulation mit Match-AT wurde das Projekt mit Hilfe der Bündelausgleichsoftware BINGO im Bezug auf systematische Bildfehler analysiert (Abb. 8). Wie zu erwarten treten größere systematische Fehler nur in den Bildern ohne TDM-Korrektur auf.



Abbildung 8: Systematische Restfehler im Bild ohne TDM (links) bzw. mit TDM-Korrektur (rechts)

# 5 Schlussfolgerungen

Die durch die temperaturabhängige Sensordrift entstandenen Bilddeformationen können mittels des vorgestellten Korrekturverfahrens TDM erfolgreich bereits im Level02-Bild eliminiert werden. Da die betragsmäßig größten, zeitlich variablen und symmetrischen Fehleranteile vorab korrigiert werden, können auch "Problemflüge" (mit großen und stark variierenden Temperaturdifferenzen) erfolgreich mit jeder Bündelausgleichs-Software trianguliert werden. Die Abspaltung des großen, variablen Fehleranteils erlaubt aber weiters auch eine bessere Bestimmung der verbleibenden, betragsmäßig kleinen, nicht symmetrischen und zeitlich konstanten Fehleranteile. Diese können durch speziell auf die UltraCam zugeschnittene zusätzliche Parameter (ADPA) im Bündelausgleich bestimmt werden. Zurzeit sind diese speziellen Parameter jedoch nur in den Programmen BINGO (GIP, Aalen) und BLUH (Universität Hannover) verfügbar.

## 6 Literatur

- GRUBER, M. & LADSTÄDTER, R., 2006: Geometric issues of the digital large format aerial camera UltraCamD. International Calibration and Orientation Workshop EuroCOW 2006 Proceedings, 25-27 Jänner 2006, Castelldefels, Spanien.
- KRÖPFL, M., KRUCK, E. & GRUBER, M., 2004: Geometric Calibration of the Digital Large Format Aerial Camera UltraCamD. XXth ISPRS Congress Proceedings, 12-23 Juli 2004, Istanbul, Türkei. In: IAPRS, Vol. XXXV (B1), S. 42 ff.

# Möglichkeiten und Einschränkungen des kombinierten Einsatzes digitaler Luftbildkameras und luftgestützter Laserscanner

### ALBERT WIEDEMANN, WENCKE PETER<sup>1</sup> & MARTIN SCHMITS<sup>2</sup>

Zusammenfassung: Großformatige Luftbildkameras, wie die Vexcel Ultracam D und luftgestützte Laserscanner wie der Optech ALTM 3100, erfordern unterschiedliche Flugprofile zur Erzielung optimaler Ergebnisse. Allerdings ist der sequentielle Einsatz beider Technologien mit doppelten Flugstunden verbunden und die Daten sind nicht zum gleichen Zeitpunkt aufgenommen. Daraus resultieren wirtschaftliche und inhaltliche Nachteile. Bei der BSF Luftbild GmbH wurde in Zusammenarbeit mit der Swissphoto AG (beide Swisphoto Group) daher ein Konzept aufgestellt im großstädtischen Bereich und in deren Einzugsgebiet einen kombinierten Bildflug durchzuführen. Dieses wurde bei einem Großprojekt in der Stadt Paris realisiert. In dem Paper werden die gewählten Flugparameter erläutert, die gewonnen Daten diskutiert und die abgeleiteten Ergebnisse vorgestellt.

## 1 Ziel des Vorhabens

Wichtigstes Ziel des Projekts war die Erstellung digitaler Orthophotos im städtischen Bereich. Die von manchen Firmen angebotenen True Or thophotos können ohne den Effekt, dass gerade Dachkanten im Rahmen der differentiellen Ent zerrung zu gekrümmten Linien werden, nur mit einem immensen manuellen Aufwand erstellt we rden. Dazu müssen sämtliche tiefenrelevanten Bruchkanten im Rahmen der Auflösung des gewünschten Orthophotos einzeln gemessen und bei der Erstellung des Oberflächenmodells berücksich tigt werden. Dieser Aufwand entspricht fast dem Aufwand einer vollständigen manuellen 3D Erfassung des Objektraums und widerspricht so der Philosophie des Orthophotos als schnellem und kostengünstigem Produkt.

Auf der anderen Seite bestand der Kunde auf einem Produkt, in dem die Gebäude, zumindest im städtischen Gebiet, weitgehend von oben mit maximal 25% Umklappung dargestellt würden. Dabei war von folgenden Zielvorgaben die Rede: Hohe geometrische Auflösung der Bilder und der Geländemodelle und begrenzte Gebäudeumklappung in den zu erstellenden Orthophotos. Die Parameter wurden für das Zentrale Gebiet der Stadt Paris (1200 km<sup>2</sup>) und den verbleibenden Großraum (5400 km<sup>2</sup>) unterschiedlich gewählt.

Wichtig waren natürlich auch die vollständige Deckung des Gebietes und möglichst wenig sichttote Räume. Während ein einzel ner Baum bei der Erstellung von digitalen Geländemodellen aus Bilddaten per Flächenbasiertem Matching einen Bereich in Größe der Mustermatrix um die Krone negativ beeinflusst (z.B. 15 Pixel mal 18 cm = 2,7 m), kann in Abhängigkeit von der Vegetationsdichte das Geländemodell aus Lasersca nnerdaten nur unter der Krone oder gar nicht beeinträchtigt werden. Gelingt es, aus untersc hiedlichen Blickwinkeln unter den Baum zu blicken, können sichttote Räume fast vollständig vermieden werden.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> BSF Luftbild GmbH, Mittelstr. 7,D-12529 Schönefeld, {albert.wiedemann, wencke.peter}@bsf-luftbild.de

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Swissphoto AG, Dorfstr. 53, Dorfstrasse 53, CH-8105 Regensdorf-Watt, martin.schmits@swissphoto.ch

Aus diesem Grund war der Einsatz des Laserscannersystems im Projekt dingend angeraten. Nur so konnte die Erstellung des hoch auflösenden und flächendeckenden Geländemodells mit einem vertretbaren Aufwand an manueller Arbeit möglich realisiert werden.

## 2 Rahmenbedingungen

### 2.1 Zielvorgaben

Zu befliegen war ein großer Bereich. Die Auflösung der Bilddaten sollte bei 18 cm am Boden liegen. Im städtischen Gebiet waren ein digitales Geländemodell, sowie ein digitales Oberflächenmodell mit einer Maschenweite von 1 m, im Einzugsgebiet mit 2 m gefordert. In Fluggebiet liegen drei internationale Flughäfen mit sehr starken Verkehrsaufkommen, was den Einflug in der gewünschten Höhe weiter erschwerte.

### 2.2 Verfügbare Technologie

### 2.2.1 Digitale Kamera: Vexcel Ultracam D

Die Ultracam D der Firma Vexcel ist eine inzw ischen weit verbreitete, großformatige digitale Luftbildkamera. Das Bildformat ist rechteckig und ein zusammengesetztes Bild hat eine Auflösung von 11  $500 \times 7500$  Pixel, mit 12 signifi kanten Bits. Von der BSF Luftbild GmbH wurde die Kamera in Höhen zwischen 500 m und 8 000 m über dem Meeresspiegel eingesetzt. Die Kamera ist in einer stabilisierten Plattform SM2000 montiert.

Panchromatisches Bildformat	11 500 x 7 500 Pixel @ 9µm
	103,5 x 67,5 mm
Objektivbrennweite und Apertur	101,4 mm, f 1/5.6
Gesichtsfeld in / quer zur Flugrichtung	55° / 37°
Multi-Spektral (R/G/B/NIR)	4 008 x 2 672 Pixel @ 9µm
Verschlusszeiten	1/500 – 1/60 Sek.
Bewegungskompensation	FMC mit TDI-Steuerung
Bildwiederholrate	bis 1.3 Bilder pro Sekunde
Radiometrische Auflösung	12 – 14 bit (mit 16 bit registriert)
Positionierungs- und Orientierungssystem	IGI Aerocontrol II mit Ashtech DGPS

Tab. 1: Technische Daten der Luftbildkamera Vexcel UltraCam D

### 2.2.2 Laserscanner ALTM 3100

Die Swissphoto Group AG verfügt über ein Laser-/Digitalkamera-Systems ALTM 3100 von Optech, Kanada. Die Hauptkomponenten des Systems sind ein Lasersystem mit bis zu 100 000 Laserimpulsen pro Sekunde und integriertem Positionierungs- und Orientierungssystem (GPS und IMU), eine Digitalkamera Applanix DSS mit 4 000 × 4 000 Pixeln und ein Planungs- und Navigationssystem für die interaktive Flugplanung und für die "In-flight"- Überwachung während dem Flug. Das Sensorsystem wird vervollständigt durch bewährte Analyse- und Qualitätssichernde Prüfprogramme, die im Zuge diverser Projekte bei Swissphoto in den letzten Jahren entwickelt wurden (LÜTHY et al, 2005). Das System kann in Flughöhen zwischen 80 und 3 500 m über Grund eingesetzt werden.

Einsatzbereich	80 – 3 500 m über Grund
Laserwiederholrate	< 100 kHZ @ 1.1 km Flughöhe
	< 70 kHZ @ 1.7 km Flughöhe
	< 50 kHZ @ 2.5 km Flughöhe
	< 33 kHZ @ 3.5 km Flughöhe
Lagegenauigkei	1 / 2 000 × Flughöhe
Höhengenauigkeit	< 15cm @ 1.2 km
	< 25cm @ 2.0 km
	< 35cm @ 3.0 km
Scanfrequenz (Zeilenfrequenz)	55° / 37°
Scanwinkel (Öffnungswinkel)	variabel, max. 70 Hz
Pulslaufzeitmessung	1 cm Auflösung, bis 4 Echos pro Puls
Strahldivergenz	wählbar: 0.3 oder 0.8 mrad
Intensitätsaufzeichnung	12 bit für jede Messung
Positionierungs- und Orientierungssystem	Trimble GPS und Applanix POS-AV

Tab. 2: Technische Daten des Laserscannersystems Optech ALTM 3100

### 2.2.3 Flugzeug Cessna 404 und Zusatzausstattung

Zum Einsatz kam die Cessna 404 der BSF Luft bild GmbH mit zwei Kameraöffnungen Beide Sensorsysteme haben ein nicht unerhebliches Ge wicht und eine nicht zu unterschätzenden Raumbedarf. Des Weiteren waren zwei Operateure erforderlich. Dennoch ist das Flugzeug in der Lage, lange Missionen durchzuführen (> 8 h). Die Navigation im Kombiflug erfolgt mit dem Navigationssystem CCNS4 der Firma IGI.

## 3 Befliegung

### 3.1 Flugplanung

Die Flugplanung sollte auf die besonderen Anforder ungen des Kunden eingehen, beiden Sensorsystemen gerecht werden und eine ökonomisch e ffiziente Befliegung ermöglichen. Zunächst wurde das gesamte Befliegungsgebiet in zwei unterschiedliche Zonen aufgeteilt. Über das gesamte Gebiet war eine Bodenauflösung der dig italen Luftbilder von nominal 18 cm gefordert. Dies bedingt bei der Vexcel UltraCam D ei ne Flughöhe von ca. 2000 m über Grund. Bei dieser Flughöhe kann das Lasersystem mit maximal 50 kHz aufzeichnen.

Vor allem widersprechen sich die gewünschte n Fluggeschwindigkeiten. Bei der gewählten Flughöhe spräche bei der digitalen Luftbildka mera angesichts der vorhandenen FMC nichts gegen eine etwas höhere Geschwindigkeit, um in der verfügbaren Zeit mehr Fläche zu erfassen, das Laserscannersystem hingegen profitiert von langsameren Ge schwindigkeiten, da so die Punktdichte am Boden gesteigert werden kann.

Während eine ungünstige GPS-Satellitenkonstella tion für den photogrammetrischen Flug zwar unerfreulich aber mit Hilfe von Pa sspunkten kompensierbar ist, erfordert die zwingende direkte Sensororientierung des Laserscanningsystems immer eine zumindest gute Satellitenkonstellation, was die verfügbaren Flugstunden reduziert.



Abb. 1: Ein Objekt unter neun verschiedenen Blickwinkeln aus dem Kombiflug Paris

Auf der anderen Seite erfordert das passi ve photogrammetrische Sensorsystem gute Lichtverhältnisse, wogegen diese beim aktiven Somit begrenzen beide Systeme die zur Verfügung stehenden Objektstunden. Es entstehen so für beide Systeme im Einzeleinsatz nicht anfallende Stand-by-Kosten.

In der Innenstadt stand die Minimierung der maximalen perspektivischen Gebäudeumklappung im Vordergrund. Durch das rechteckige Bildformat ergibt sich eine in der Regel stärkere Umklappung quer zur Flugrichtung, welche natür lich genauso bei Zeilenkameras auftritt, trotz ihrer propagierten "True Ortho"-Kapazität. Durch die Wahl der Längsüberdeckung von 61% und der Querüberdeckung von 70% konnte die maxima le Umklappung von Gebäuden an den Ecken der bei Most-Nadir-Schnittkanten zu verwen denden Bildbereiche auf 20% der Gebäudehöhe beschränkt werden.

Ein Nebeneffekt ist die Tatsache, dass fast je des Gebäude aus 9 verschiedenen Blickwinkeln betrachtet werden kann (Abb. 1). Dies birgt ein enormes Potenzial für die Geovisualisierung in Form real texturierter 3D Stadtmodelle.

Durch die hohe Querüberdeckung war es möglich au ch mit dem Laserscannersystem eine Querüberdeckung von über 50% zu realisie ren. Dies erlaubt in fast jede schmale Gasse hineinblicken zu können und reduziert die sichttoten Bereich des Laserscannings enorm. Die im Verhältnis zu der vorgegebene Flughöhe hohe Punktdichte von 1 Punkt / m  $^{2}$  konnte so realisieren werden, obwohl das Laserscannersystem aus dieser Höhe nur noch mit maximal 50 kHz aufzeichnet.

Der zu erfassende Einzugsbereich von Paris war mit ca. 5600 km<sup>2</sup> fast 5mal so groß wie der Innenstadtbereich. Um die Befliegung in ei ner überschaubaren Zeit zu tragbaren Kosten realisieren zu können, wurde hier auf die übliche Überdeckung von 60% längs und 30% quer zur Flugrichtung zurückgegangen.

Im Außenbereich resultierte aus der geringen Querüberdeckung von nur 30% den digitalen Bildern eine Querüberdeckung von nur ca. 10% be i den Lidar-Daten. Somit bestand die Gefahr, dass bereits auf Grund geringer Flugzeugbewegung en Datenlücken an den Streifenrändern entstehen könnten. Da aber die Möglichkeit best and, eventuell entstehende Datenlücken durch automatische und manuelle photogrammetrische Messungen in den trotzdem vorhandenen digitalen Bilddaten auffüllen zu können, wurd e das Risiko bewusst in Kauf genommen. Die befürchteten Datenlücken traten aber nicht auf.

	Zentrum	Einzugsbereich
Fläche	1244 km <sup>2</sup>	5600 km <sup>2</sup>
Blöcke	1	5
Überlappung Vexcel	61% 70%	60% 30%
Flughöhe	2000 m	2000 m
GSD	18 cm	18 cm
Maximale Umklappung	20 %	39 %
Anzahl Bilder	4500	8000
Abdeckung	6-9 Bilder / Punkt	2-6 Bilder / Punkt
Überlappung ALTM	50%	10%
Lidar-Punkte pro m <sup>2</sup> .	1,2	0,5
Laserfrequenz	50 kHz	50 kHz

Tab. 3: Flugplanungsergebnisse

### 3.2 Prozessierung

### 3.2.1 Bilddaten

Nach der Befliegung wurde unverzüglich mit der Prozessierung der Bilddaten begonnen. Dabei wurden 8 bit RGB und CIR-Bilddaten generiert. Nach ca. 4 Wochen waren 12 000 Bilder fertig prozessiert. Als etwas problematisch erwiesen sich vereinzelte Sättigungseffekte in der strahlenden Augustsonne über dem Objekt, welche jedoch durch eine Neuprozessierung minimiert werden konnten. Des Weiteren gab es etwas unvermeidbaren Dunst über den Waldgebieten.

### 3.2.2 Laserscanning-Daten

Unmittelbar nach der Befliegung erfolgte das "BasicProcessing" der LIDAR-Rohdaten, d.h. die Auswertung und Zusammenführung der Positionsdaten und der Sensordaten zur Punktwolke und die anschließende Streifenausgleichung. Gleichzeitig wurden mit einer vom Kunden zur Verfügung gestellten Software Transformationsparameter bestimmt, so dass die unklassifizierte Punktwolke in Form von 4 Minuten-Flugstreifen direkt im Franz. Nationalsystem Lambert Zone I/II-System erstellt werden konnte. Die Klassifizierung erfolgte in einem ersten Schritt automatisch. Da der anschließende, manuelle Aufwand möglichst gering gehalten werden musste, war es notwendig, die LIDAR-Daten im Vorfeld auf Besonderheiten und Inhalte zu analysieren, um den automatischen Filter mit diesen Erkenntnissen optimieren zu können. Ein Grossteil der Fehlerquellen sollte durch den automatischen Filter abgefangen werden. Zusätzlich konnte man zu diesem Zeitpunkt für die spätere Bearbeitung halbautomatische Filter entwickeln, die bei der manuellen Korrektur je nach Situation lokal eingesetzt werden konnten. Als Beispiel kann man hier das große Verkehrsaufkommen, die stark ausgeprägten Multipath-Effekte an Glasfassaden im Stadtzentrum sowie eine Vielzahl von Reflexionen im Bereich von Kellereingängen nennen. Eine andere Problematik war auf Grund der späten Befliegungszeit im August, Waldgebiete mit sehr dichten Baumkronen und die mittlerweile hochgewachsenen Maisfelder im ländlichen Bereich. Die Punktwolke wurde in die Klassen Boden, Gebäude und Übrige aufgeteilt. Dabei galten folgende Spezifikationen:

- Bodenpunkte wurden automatisch klassifiziert und manuell korrigiert. Dabei mussten beständige und unbeständige Gebäude, Vegetation jeglicher Art, Kraftfahrzeuge und Schiffe jeglicher Art sowie gelagerte Materialien und sonstige Objekte aus der Klasse entfernt werden.
- Gebäude wurden automatisch mit Filter klassifiziert, der eigens für den Zweck, Gebäude aus LIDAR-Daten, abzuleiten auf KI-Basis entwickelt und realisiert wurde. Dieser Filter hat im Vergleich mit herkömmlichen Filtern den Vorteil, dass er neben einer sehr hohen Trefferquote der Dächer (>85 %) auch Gebäudewände erkennt. Eine weitere manuelle Korrektur der Gebäudeklassifizierung war nicht vorgesehen und wurde nur im Innenstadtbereich stellenweise durchgeführt.
- Alle übrigen Objekte inklusive der Vegetation bilden die Klasse "Übrige". Dabei wurde darauf geachtet, dass Kraftfahrzeuge und Eisenbahnen möglichst automatisch erkannt und aus der Klasse "Übrige" entfernt wurden.
- Fehlmessungen wie Multipath-Effekte, Reflexionen auf Wolkenfetzen, Vögeln usw. mussten aus allen Klassen manuell oder automatisch entfernt werden.

Obwohl die Spezifikationen keine High Level Detailklassifizierung forderten, war es doch zwingend erforderlich, dass jeder Datensatz auf Fehler überprüft und ggf. korrigiert werden musste, was im Normalfall eine weitere Kontrolle nach sich zog. Die Abgabeeinheit der LIDAR-Datenmodelle war 1 km x 1 km. Die geforderte Punktdichte (siehe Kap. 3.1.3) ließ bei ausreichend guter Performance eine Produktionseinheit von 2 km x 2 km zu.

Bereits in anderen LIDAR-Großprojekten hatte es sich bewährt, ein Datenbankgesteuertes Prozess- und Datenmanagementsystem für das so genannte "Advanced Prosessing" einzusetzen.

Dieses Vorgehen sichert gerade in einem Projekt dieser Größe, welches in kurzer Zeit gleichzeitig von mehreren Sachbearbeitern abgewickelt werden muss, dass durch einen standardisierten Arbeitsablauf die geforderten Spezifikationen innerhalb des vorgegebenen Zeitrahmens und in einer weitgehend homogenen Qualität erreicht werden. Wichtig in diesem Prozess sind die Kontrollierbarkeit und die Korrigierbarkeit der Nachbarschaft sowie eine Übersicht über den Status ieder Punktdatei bzw. ieder Region.

Für die Abgabe wurde aus den klassifizierten LIDAR-Daten ein Digitales Geländemodell / Digitales Oberflächenmodell in Form eines ASCII-Rasters extrahiert und in die kleineren Abgabeeinheiten von 1 km x 1 km aufgeteilt. Die klassifizierten Rohdaten wurden ebenfalls auf diese Einheit verkleinert und als ASCII-Datei mit den Attributen Zeitstempel, Rechtswert, Hochwert, Höhe, Klasse und Reflexionsnummer abgegeben. Nach anfänglichen Schwierigkeiten



Abb. 2: Digitales Geländemodell (DTM), Digitales Oberflächenmodell (DSM) und Digitales Orthophoto einer Kachel

mit der Transformation im Landessystem und der Bereinigung von Unklarheiten bzgl. Klassifizierung und Datenformaten konnte der straffe Lieferplan eingehalten werden, so dass sämtliche LIDAR-Daten von Anfang Oktober 2005 bis Anfang Januar 2006 nach Spezifikation klassifiziert und in den vorgegebenen Formaten schrittweise abgegeben werden konnten.

### 3.2.3 Photogrammetrische Bearbeitung

Während der Prozessierung der Laserscanner-Daten wurde bereits die Aerotriangulation durchgeführt. Die Ergebnisse waren sehr überzeugend. Auf der Basis der DGPS- und INS-Werte wurde unter zu Hilfenahme einer geringen Zahl von Passpunkten die Aerotriangulation mit Blöcken bis zu 4 200 Bildern durchgeführt. Es wurde eine Lagegenauigkeit von  $\pm$  7 cm und eine Höhengenauigkeit von  $\pm$  10 cm erreicht. In einem Streifen von ca. 20 km Länge war es zu einem Ausfall des Laserscannersystems gekommen. Hier konnte mit Hilfe der digitalen Photogrammetrie und manueller Stereoauswertung die entstandene Lücke im Datensatz problemlos geschlossen werden. Im letzten Produktionsschritt erfolgten die differenzielle Entzerrung und die geometrische und radiometrische Mosaikbildung unter Verwendung der inneren Bereiche der Bilder und manuell bearbeiteter Schnittkanten. Versuche mit automatischen Schnittkanten waren im städtischen Bereich nicht zufrieden stellend.

### 3.3 Ergebnisse

### 3.3.1 Digitale Gelände- und Oberflächenmodelle

Aus den klassifizierten Punktwolken des Laserscanner-Systems wurden digitale Gelände- und Oberflächenmodelle abgeleitet. Die Lücken im Datenmodell wegen Gebäuden oder fehlender Reflektionen (vor allem im Wasser) wurden bei diesem Schritt durch Interpolation automatisch geschlossen. Der manuelle Aufwand für die Prozessierung der Laserscanner-Daten lag deutlich unter dem Aufwand einer stereophotogrammetrischen Datenerfassung für die Erstellung eines

vergleichbaren Digitalen Geländemodells im Innenstadtbereich. Hier konnte durch den Einsatz des Laserscannersystems sowohl die Qualität gesteigert, als auch der wirtschaftliche und zeitliche Aufwand reduziert werden.

#### 3.3.2 Digitale Orthophotos

Als wichtigstes Ergebnis lagen ca. 8 Monate nach Abschluss der Befliegung von ca. 6800 km<sup>2</sup> Digitale Gelände- und Oberflächenmodelle (Abb. 3), sowie Orthophotokacheln mit einer Bodenauflösung von 12.5 cm vor. Diese haben eine sehr hohe geometrische Genauigkeit und zeigen Paris in einer bis dahin nicht vorhandenen Oualität. Die Bilder aus der Digitalen Luftbildkamera weißen deutlich geringere radiometrische Inhomogenitäten auf als analoge Bilder. Durch die hohe Überdeckung kommt es nur zu geringen Gebäudeumklappungen. so dass auch an den Schnittkanten kaum eine Änderung der Blickrichtung der Ausgangsbilder deutlich wird.

### 4 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts konnte gezeigt werden, dass der kombinierte Einsatz von ALTM-System und großformatigen Luftbildkameras sowohl technologisch als auch wirtschaftlich sinnvoll ist. Zwar ist der instrumentelle Aufwand vor Ort enorm, durch die Kombination im erforderliche Flug kann aber Ressourceneinsatz weitgehend kompensiert werden. Bei den hohen Flugkosten eines geeigneten Flugzeuges, insbesondere aber in Bereichen, wo der Einflug generell problematisch ist (z.B. im Bereich großer Luftkreuze), gilt es in kürzester Zeit ein Maximum an Daten zu erfassen. Dabei ist das enorme Potential der Daten bei weitem noch nicht ausgeschöpft.

## 5 Literaturverzeichnis



Abb. 3: Oberflächenmodell im Bereich des Eifelturms



Abb. 4: Scheinbares Schrägbild (vom Rand eines Senkrechtluftbildes) vom Eifelturm

LÜTHY, J.; INGENSAND, H. & STENGELE, R., 2005: Production Suite for Airbourne Data, Optical 3D, Wien.

## High Accuracy 3D Processing of Stereo Satellite Images in Mountainous Areas

### A. GRUEN<sup>1</sup>, S. KOCAMAN<sup>1</sup> & K. WOLFF<sup>1</sup>

Abstract: Mountain areas are very crucial places for the future monitoring and management of precious natural resources of mankind. Among the various monitoring tools aerial and satellite images will play an ever increasing role. In particular high resolution satellite images at sub-5m footprint with stereo capabilities are in the focus of interest. They are becoming increasingly available through more and more missions, better performance and at seemingly reduced costs. They constitute an excellent device for accurate and fast information extraction over large areas, even in very inaccessible terrain. The related cameras are all using Linear Array CCD technology for image sensing. The possibility and need for accurate 3D object reconstruction and georeferencing requires sophisticated camera and trajectory models, being able to deal with such sensor geometry. We have recently developed a full suite of functions and the related software for the precision processing of this kind of data. The corresponding software SAT-PP (Satellite Imagery Precision Processing) includes a number of functionalities and module which will briefly be addressed in this paper.

The software can accommodate images from IKONOS, Quickbird, ALOS PRISM, SPOT-5, Cartosat-1 and sensors of similar type to be expected in the future. The functionality of the methods and software will be verified by results from validation projects in Switzerland (testfield Bern/Thun) and Italy (testfield Piemont). We put particular emphasis on the georeferencing aspects, the automatic generation of DSMs, which can be done with pixel level accuracy.

### 1 Introduction

"We are all mountain people – whether we live at sea level or at the highest elevations, we are all mountain people. We are connected to mountains and are affected by mountains in more ways than we can imagine. Mountains provide most of the world's fresh water, harbor as much or more biodiversity than any other areas and are home to at least one in ten people. Yet, war, poverty, hunger, climate change and environment degradation are threatening the web of life that mountain support..." (UN GENERAL ASSEMBLY, The Year of the Mountains, 2002).

Mountains are key regions for the future. 50% of mankind depends directly or indirectly on its resources – water, wood, and other raw materials, and energy. Mountain regions react in a particularly fragile manner to changes of climate, population pressure, intensification of use of natural resources and environmental pollution. There are basically two major questions of interest: How do environmental changes and human impact influence these eco-systems? How can natural resources be used in a better way to ensure sustainability? In order to develop scenarios of future developments scientists use a broad spectrum of information sources: Existing records, field studies, measurement networks, laboratory experiments,

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> ETH Zurich, Institute of Geodesy and Photogrammetry 8092 Zurich, Switzerland

photogrammetry/remote sensing, GIS and computer simulations. Efficient monitoring techniques are essential. Photogrammetry and remote sensing provide excellent and efficient tools for that. They can cope very well with the inaccessibility of mountain regions and the difficulties of taking direct field measurements. Among the various sensors used in photogrammetry and remote sensing high resolution stereo satellite images play an ever increasing role. The improved availability of imagery by many new missions and the drop in price (example ALOS/PRISM) make them an attractive sensor of choice. The efficient use of such imagery requires software of high quality, in terms of functionality, user-friendliness and quality of results. Only if the inherent accuracy level for georeferencing, DSM generation, feature and object extraction, orthoimages, etc. is exploited, can these primary data sources be used in an effective way.

In this paper we will first summarize some previous work which we did with aerial and satellite imagery, all related to mountainous areas. Then we will describe more in detail the recent results which we obtained in georeferencing and DSM generation using ALOS/PRISM images over the testfields Bern/Thun, Switzerland and Piemont, Italy. For this we used our own software SAT-PP for data processing. Therefore we also describe briefly the different modules of this software.

## 2 Previous experiences with 3D modeling of mountainous areas

In the past we have worked on quite a number of 3D modeling projects, all involving mountainous areas, in one way or another. For details please visit our webpage www.photogrammetry.ethz.ch under PROJECTS and see GRUEN, 2005. Here we give only a brief summary:

+ **Mount Everest.** A DTM of an area of 25x25 sqkm around the summit was derived by digitizing contour plots of scale 1: 10 000. Then a block of aerial images (image scale 1:35 000) was re-triangulated, the images scanned, and an ortho-image mosaic produced. This mosaic was texture-mapped to the DTM, creating thus a very high resolution hybrid 3D model (DTM grid spacing 10m, radiometry resolution 1m). For more details see GRUEN & MURAI, 2002.

+ Ayers Rock, Australia. A stereo model of colour aerial images was scanned and a DTM derived by manually measuring profiles. An ortho-image was texture-mapped onto the DTM.

+ **Tucume, Peru.** Although this cultural heritage site is not a mountainous area in the traditional sense it has a topographical structure that resemb les a mountain region. In addition we wish to list this project here, because it shows an a dditional advantage of image-based modeling approaches. By using old images one can go back in history and trace the development of a particular object over time.

The so-called "Pyramids of Túcume" represent a unique example of adobe architecture built during different periods of pre-hispanic cultures along the Atlantic cost of Peru. From the *Cerro La Raya*, a characteristic hill in the centre of the s ite, 26 adobe buildings are visible, the largest one, *Huaca Larga*, with a base length of 545m, 110m in width and 21m in height. Besides the pyramids, the complex contains platforms, citade ls, residential areas and cemeteries. As the adobe structures are heavily affected by wind eros ion, the architecture should be modelled as well as possible in an unaffected state. For this reason, aerial imagery from the years 1949 and

1983 was acquired, which shows the adobe complex in two different states. The photogrammetric products derived from the or inted 1949 images are a manually measured DTM, an automatically generated DSM, an or thomosaic and a photorealistic 3D model. For details see SAUERBIER et al., 2004. The 3D model now can serve archaeologists and other scientists as a means for documentation, analysis and presentation of the Cultural Heritage site of Túcume in a state of preservation as of 1949.

+ **Machu Picchu, Peru.** Machu Picchu, the mysterious Inka site on a spectacular saddle between high rising slopes of the Andean mountains close to Cusco, is suffering from its own success as a tourist site. More that a Million visitors per year, together with natural hazards like flooding and slope failure, constitute a perman ent threat for this very fragile environment. UNESCO is coordinating international activities with the goal of monitoring environmental changes and finding measures for sustainable and sensitive us e of the site. As part of this activity we generated a DTM from existing aerial images 1: 25 000 and we texture-mapped the grey-value pixels of the scanned image content (see Figure 1). This model will serve as the basis for further investigations by various experts.



Figure 1: 3D model of Machu Picchu, Peru. The model was derived from already existing aerial B/W images of scale 1:25 000, because no suitable satellite images were available at that time

At the time of model generation no suitable satellite images were available. Today the situation is different and one could as well have used a satellite image stereomodel.

+ **Thimpu, Bhutan.** A hybrid 3D model of the area around the capital of Bhutan, Thimpu, was derived from a Quickbird stereomodel (Figure 2). All work was based on SAT-PP. The DSM and the texture-map were generated automatically . This pilot project was meant to show the performance and suitability of highresolution sa tellite imagery for generating of updating a topomap 1:50 000.

+ **Nisyros Island, Greece.** From an IKONOS stereomodel hybrid 3D model was generated. This model was overlayed with vector information lik e buildings, road network, tectonic features,

GPS and gravimetry stations, and fumaroles for ge ological investigations. Main applications are geological and geophysical studies of this volcanic island.

For information about other projects like **Matterhorn, Switzerland** (aerial images), **Bamiyan, Afghanistan** (SPOT and IKONOS images), CNES/ISPRS test area **Chiemsee, Germany** (SPOT images) please see our webpage <u>www.photogrammetry.ethz.ch</u> under PROJECTS and the related references.



Figure 2: 3 D model of Thimpu, Bhutan, derived from a Quickbird stereomodel



Figure 3: 3D model of Nisyros Island, Greece, derived from an IKONOS stereomodel.

## 3 SAT-PP - Processing Software For Highresolution Satellite Images

### 3.1 General modules

The software package SAT-PP consists of a number of novel algorithmic approaches, all related to the sensor model for Linear Array image data, in particular for georeferencing, automated DSM generation by image matching and ortho-image generation. SAT-PP was originally derived from a software package, developed for the processing of aerial Three-Line-Scanner images (TLS/STARIMAGER of Starlabo Inc, Tokyo and ADS40, Leica Geosystems, Heerbrugg). Now it not only is used for the processing of Linear Array satellite and aerial images, but the matcher is also applied to derive DSMs from aerial and even terrestrial single frame imagery.

The mathematical description of the sensor and trajectory models for single image georeferencing, stereo model orientation and block adjustment is given in GRUEN & ZHANG (2003), ZHANG & GRUEN (2006), GRUEN et al. (2005), ZHANG (2005).

The software package SAT-PP consists of the following components (Figure 4):

- + User interface for project and data management, image format conversion and pre-processing (with an edge-preserving smoothing filter) and image display / roaming in mono and stereo modes
- + Sensor and trajectory models (rigorous and generalized ones such as the rational function model, affine projection model and projective Direct Linear Transform) adjusted to the high-resolution Linear Array sensor geometry

- + Orientation of single stereo models and triangulation of larger units. On-line quality control and error analysis via interaction with graphics elements. Ground control point (GCP) and tie point measurement in manual and semi-automated modes
- + Derivation of quasi-epipolar images for stereo mapping and feature collection
- Automated generation of Digital Surface Models (DSMs) by using a precise and robust image matching approach. Stereoscopic checking of the automatically matched features
- + Generation of orthorectified images
- + Mono-plotting functions with existing or automatically derived DTMs. Stereoscopic measurement and collection of objects with particular emphasis on 3D city modeling by using the semi-automatic 3D modeling software CyberCity ModelerTM
- + Pan-sharpened image generation to enhance the visual information of multispectral imagery by fusing it with the detailed spatial information of panchromatic imagery. Fully automated sub-pixel image registration between multispectral and panchromatic imagery



Figure 4: Workflow of the SAT-PP software system

We have implemented additional functions to accommodate the ALOS/PRISM images and the metadata. The rigorous model is refined for the orientation of the PRISM imagery. A detailed description of the sensor orientation and calibration is given in GRUEN et al. (2007) and KOCAMAN GRUEN (2007).

### 3.2 Image Matcher for DSM generation

Our approach uses a coarse-to-fine hierarchical solution with a combination of several image matching algorithms and automatic quality control. The approach essentially consists of 3 mutually connected components: the image pre-processing, the multiple primitive multi-image (MPM) matching and the refined matching procedure. The images and the given or previously estimated orientation elements are used as input. After pre-processing of the original images and production of the image pyramids, the matches of three feature types (feature points, grid points and edges) in the original resolution images are found progressively starting from the low-density features in the lowest resolution level of the image pyramid. A TIN form DSM is reconstructed from the matched features at each pyramid level by using the constrained Delauney triangulation method. This TIN in turn is used in the subsequent pyramid level for derivation of approximations and adaptive computation of some matching parameters. Finally and optionally, least squares matching methods are used to achieve more precise results for all matched features and for the identification of some false matches. Details of this matching approach can be found in ZHANG & GRUEN (2004, 2006) and ZHANG (2005).

## 4 Experiences with Calibration/Validation over the testfields Bern/Thun and Piemont

The Bern/Thun testfield has been established by our group for the calibration and validation of geometrical aspects of satellite imagery. In an earlier version of the testfield, then called "Thun", we used IKONOS stereos and triplets for investigation. For the results of these studies see BALTSAVIAS et al. (2006) and EISENBEISS et al. (2004). The testfield in its current form with 108 GCPs and three sub-areas of height reference data was set up under a contract with the Japanese Space Agency JAXA. The coordinates of the GCPs were determined by GPS. One PRISM image triplet has been acquired over the Bern/Thun testfield in September 2006. 82 of the GCPs could be measured in the PRISM images.

The Piemont testfield is located in the north-western part of Italy. The testfield was set up by GAEL, France. The coordinates of the GCPs were determined by GPS. One PRISM image triplet has been acquired over the testfield in September 2006.

In both testfields, the image triplets have the same viewing angles (-23.8°, 0°, 23.8°).

### 4.1 Georeferencing results

### 4.1.1 Bern/Thun Testfield, Switzerland

The orientation results are given in Figure 5. The DGR and the PPM with two segments per trajectory are tested separately for comparison. Detailed explanation of the trajectory models can be found in GRUEN & ZHANG (2003). The a posteriori sigma naught values range between 0.37-0.53 pixels. The accuracy both in planimetry and height, as evidenced by RMSE(XY) and RMSE(Z), is below one pixel in all DGR tests. The PPM is instable with a small number (5) of GCPs. More details on the results are given in GRUEN et al. (2007).

#### 4.1.2 Piemont Testfield, Italy

The DGR model and the PPM have been tested with two different GCP configurations and the results are given in Figure 6. The accuracy values are at sub-pixel level for all models. The DGR model performs better than the PPM in the 5 GCPs configuration. The a posteriori sigma naught values are very similar in all tests and vary between 0.27-0.29 pixels. A more detailed explanation of the sensor orientation and calibration in this testfield can be found in GRUEN et al. (2007).



Figure 5: Bern/Thun tests accuracy results (RMSEs and standard deviations, computed for check point coordinates).



Figure 6: Piemont tests accuracy results (RMSEs and standard deviations, computed for check point coordinates).

### 4.2 DSM generation

### 4.2.1 Bern/Thun Testfield, Switzerland

For the validation of the sensor model of PRISM we used the whole area, for the validation of the DSM generation we used three smaller parts. For the generation of the reference DSMs we made use of aerial images of scale 1:25 000 to 1:34 000 and our software package SAT-PP. We defined the rivers and bigger lakes as dead areas without any given height. The expected accuracy of the reference DSMs is in the range of 0.5 m to 2.5 m and is therefore by a factor 5 better than the expected PRISM matching results (GRUEN et al., 2006).

The generated DSM without any manual correction is shown in Figure 7 together with the areas of the three DSM testfields. The grid spacing is 5 m (2 pixels). We evaluated the DSM accuracy for each testfield separately and also for different sub-areas with special topographic or land use features (open areas, city areas, forest and alpine areas). Here, we go into detail for the mountainously area of the south western part of the test area (SW) with a maximal height difference of 1500 m. For more details of the other sub-areas see WOLFF & GRUEN (2007).

Figure 8 shows the mountainous area of the sub area SW in detail together with the grey value coded residuals of the differences between the generated DSM and the reference DSM. The problems around the mountain ridge are recognizable.

Table 1 gives an overview of the DSM accuracy evalua tion results in the area SW and the ver y hilly southern part (A1). The whole sub-area contains more than 2.7 million points and the mountainous area more than 800 000. The overall RMS height error rs for all three test areas shown in Figure 7 are better than three pixels (5.5 m - 6.6 m). The RMS height Errors for the alpine area of SW is around 6.7 m, which is not mu ch worse. We also note that there are still a number of large blunders left which need manual or automatic editing.



Figure 7: Shaded DSM of testfield Bern/Thun (grid spacing 5 m). The three smaller test areas are marked. The sub-area SW (south west) is a mountainous area, largely covered with trees, with a max. height difference of 1500m.



Figure 8: Southern part of testfield SW with high mountains (lower right corner). Left: the generated DSM, dark areas are high areas. Right: Grey value coded residuals of the differences between the generated DSM and the reference DSM. Darker areas mean higher differences. The problems around the mountain ridge are recognizable.

Table 1. DSM accuracy evaluation results of the test area SW (So	outhWest) and its alpine sub area.
--	------------------------------------

TF	No. of points	RMSE(Z) [m]	Mean [m]	Min [m]	Max [m]	$Z_{GEN}$ - $Z_{REF}$ <5m	$Z_{GEN}$ - $Z_{REF}$ 5m-12.5m	$Z_{GEN}$ - $Z_{REF}$ 12.5m-25m	$Z_{GEN}$ - $Z_{REF}$ >25m
SW	2752822	6.6	0.55	-76.9	84.5	70.7%	23.6%	4.8%	0.9%
- A1	815265	6.7	2.2	-46.4	80.0	74.0%	20.9%	4.6%	0.5%

### 4.2.2 Piemont Testfield, Italy

For the testfield Piemont no reference DSM is given by now. Therefore a quality analysis could not be realized. The generated DSM of the Piemont testfield is shown in Figure 9. The mountainous character of this area is obvious.



## 5 Conclusions

With a number of examples we have shown how image-based methods can be used for 3D modeling of mountainous areas. We have applied ae rial images of various types, including even model helicopter images. In this paper we have focused on the use of high resolution stereo satellite images for georeferencing and DSM genera tion. We have validated georeferencing and DSM generation using early ALOS/PRISM images over two testfields: Bern/Thun, Switzerland and Piemont, Italy. The results are very consiste nt with earlier results obtained with SPOT-5, IKONOS and Quickbird images. In georeferencing a sufficiently high developed sensor model. In height we achieved with PRISM data even better RMSEs than was predicted by the related standard deviations.

The DSM accuracy ranges between 1 and 5 pixe ls, depending on the topography, vegetation, image texture, and image quality. In the wors t case – very steep te rrain with strong tree coverage- we have to expect 5 pixels accuracy. We noticed that there are still some blunders in the results left. Here, an automated and intel ligent blunder detection procedure would be very beneficial.

Of course other products can also be derived from satellite images: Building and city models (GRUEN et al., 2006), road networks, water surfaces, forest borders, land use patterns, etc. and also change detection can be performed.

Beside satellite images also aerial ones can be used for mountain area modeling and monitoring. However, the attractiveness of satellite image us e is increasing with the constant increase in geometrical resolution. With the planned WorldV iew-I satellite of DigitalGlobe and its 41 cm footprint one enters the resolution domain of aerial images.

### 6 References

- BALTSAVIAS, E., ZHANG, L. & EISENBEISS, H., 2006: DSM Generation and Interior Orientation Determination of IKONOS Images Using a Testfield in Switzerland, Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation 2006, 1, pp. 41-54.
- EISENBEISS, H., BALTSAVIAS, E., PATERAKI, M. & ZHANG, L., 2004: Potential of IKONOS and QUICKBIRD Imagery for Accurate 3D Point Positioning, Orthoimage and DSM Generation. IAPRS, Vol. 35, Part 3, XXth ISPRS Congress, 12-23 July, Istanbul, Turkey.
- GRUEN A. & MURAI S., 2002: High-resolution 3D Modelling and Visualization of Mount Everest. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 57, pp. 102-113.
- GRUEN A. & ZHANG L., 2003: Sensor Modeling for Aerial Triangulation with Three-Line-Scanner (TLS) Imagery. Journal of Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG), 2/2003, pp. 85-98.
- GRUEN, A., 2005: New Technologies for Efficient Large Site Modeling. 3D-ARCH 2005: Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, 22-23 August, Mestre-Venice, Italy.
- GRUEN A., ZHANG L. & EISENBEISS H., 2005: 3D Precision Processing Of High Resolution Satellite Imagery, ASPRS 2005 Annual Conference, Baltimore, Maryland, USA, March 7-11, on CD-ROM.
- GRUEN A., ZHANG L. & KOCAMAN, S., 2006: High Accuracy 3D Processing of Satellite Imagery, Proceedings of the JACIE Civil Commercial Imagery Evaluation Workshop, Laurel, Maryland, USA., on CD-ROM
- GRUEN A., KOCAMAN S. & WOLFF K., 2007: Calibration and Validation of Early ALOS/PRISM Images. The Journal of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol 46, No. 1, pp. 24-38.
- KOCAMAN S. & GRUEN A., 2007: Orientation and Calibration of ALOS/PRISM Imagery. ISPRS Hannover Workshop "High Resolution Earth Imaging for Geospatial Information", Hannover, Germany, 29 May-1 June.
- SAUERBIER, M., K UNZ, M., F LÜHLER, M. & REMONDINO, F., 2004: Photogrammetric Reconstruction of Adobe Architecture at Tucume, Peru. IAPRS, Vol. 36, part 5/W1. Proc. of the International Workshop on Processing and Visualization using High Resolution Imagery, Pitsanulok, Thailand, November 2004, on CD-ROM.
- WOLFF K. & GRUEN A., 2007. DSM Generation from early ALOS/PRISM data using SAT-PP. ISPRS Hannover Workshop "High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information", Hannover, Germany, 29 May-1 June.
- ZHANG, L. & GRUEN, A., 2004: Automatic DSM Generation from Linear Array Imagery Data. IAPRS 35 (Part B3), pp. 128-133.

- ZHANG, L., 2005: Automatic Digital Surface Model (DSM) Generation from Linear Array Images. Ph. D. Dissertation, Report No. 88, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland.
- ZHANG L. & GRUEN A., 2006: Multi-image Matching for DSM Generation from IKONOS Imagery. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 60, No. 3, May, pp.195-211.

# Georegistrierung mittels Minidrohnen erfasster Videosequenzen – Ansätze und Genauigkeitsanalyse

### HANNES EUGSTER<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Dieser Beitrag beschreibt die Georegistrierung mittels Minidrohnen (engl. UAV = Unmanned Aerial Vehicle) erfasster Videosequenzen auf ein digitales 3D-Landschaftsmodell. Fluggeräte mit einem Abfluggewicht unter 30 Kilogramm fallen in diese UAV-Kategorie und enthalten meistens ein integriertes Fluglageregelungssystem. Diese Systeme setzen zur Bestimmung von Position und Orientierung der Plattform meist GPS- und IMU-Sensoren geringer Qualität ein. Die Herausforderung liegt nun darin, die erfassten Videosequenzen mit Hilfe der Informationen aus der Fluglageregelung und einem 3D-Landschaftsmodell mit bestmöglicher Genauigkeit und Zuverlässigkeit zu georeferenzieren. Mögliche Anwendungen eines solchen Systems in Kombination mit einem 3D-Landschaftmodell liegen bei der Echtzeit-Kartierung beliebiger Geoobjekte. Mögliche Einsatzszenarien reichen von Überwachungsaufgaben bei Grossanlässen bis zur Erfassung der Schadenssituation als Entscheidungshilfe im Katastrophenmanagement.

## 1 Einleitung

### 1.1 Motivation

In den letzten Jahren erlebten leichtgewichtige UAV eine rasante Entwicklung. Die heutigen Systeme bieten die Möglichkeit zur autonomen oder benutzer-unterstützten Navigation. Trotz ihres geringen Startgewichts von wenigen Kilos, können diese Systeme zusätzliche Datenerfassungssensoren wie nichtmetrische Videokameras mitführen. Der Ansatz der direkten Georeferenzierung ist in der flugzeuggestützten Photogrammetrie gut untersucht und etabliert. Im Gegensatz dazu können in Minidrohnen aus Gewichts- und teilweise auch Kostengründen keine hochwertigen GPS- und IMU-Systeme mitgeführt werden, was eine verminderte Genauigkeit in der direkten Bestimmung der Elemente der äussern Orientierung zur Folge hat. Ein möglicher Ansatz zur Steigerung der erreichbaren Genauigkeit ist der zusätzliche Einbezug photogrammetrisch bestimmter äusserer Orientierungselemente aus den Videodaten. Die Schätzung dieser Elemente kann mit Hilfe eines räumlichen Rückwärtsschnitts auf bekannte Objekte aus einem digitalen 3D-Landschaftsmodell für einzelne Bilder aus der Videosequenz erfolgen.

### 1.2 Aufbau Beitrag

Das zweite Kapitel beschreibt das für die Projektflüge eingesetzte Minidrohnensystem. Speziell werden die für die Videodaten-Georegistrierung relevanten Sensoren sowie die verwendete Videokamera beschrieben. Im zweiten Teil wird das gewählte Konzept zur Video – Fluglagedaten Zeitsynchronisation sowie die durchgeführten Projektflüge vorgestellt. Das dritte Kapitel beschreibt die Kalibrierung der Videokamera sowie die verwendeten Ansätze zur Georegistrierung der erfassten Videodaten. Dabei kommt die direkte- sowie die integrierte

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Hannes Eugster: Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Vermessung und Geoinformation

Georeferenzierung zum Einsatz. Das vierte Kapitel zeigt die erzielten Georegistrierungsgenauigkeiten auf und vergleicht und beurteilt die einzelnen verwendeten Auswerteansätze. Zum Schluss wird ein Ausblick über weitere Entwicklungsschritte gegeben sowie eine mögliche Anwendung vorgestellt.

## 2 Ausgangslage

#### 2.1 UAV Plattform – Sensoren

Die Erfassung der Videodaten erfolgte für diese Arbeit mit nachfolgend dargestelltem Minidrohnensystem der Firma weControl.

UAV-Kategorie:	Mini		
Leergewicht:	8.5 kg		IMU, Barometer
Maximale Nutzlast:	5.5 kg		1
Plattform (Hersteller):	Copter 1B (Survey Copter)	GPS-Antenne	1
Fluglageregelung:	wePilot1000 (weControl)		
	Abbildung 1: Minidrohnensyster	n Copter 1B / weControl	Videokamera

Die Plattform ist mit einem integrierten Fluglageregelungssystem ausgerüstet. Die Bestimmung der Fluglageparameter basiert auf den in Tabelle 1 aufgeführten Sensoren.

Sensor	Тур	Sensorkategorie	Genauigkeit	
GPS-Empfänger	µ-blox TIM-LP	Navigationsempfänger	Navigation 2.5m CEP 5.0m SEP	
		(Auswertung C/A-Code)	DGPS 2.0m CEP 3.0m SEP	
IMU	Crossbow IMU400CD 100	6DOF MEMS-basiert	Bias roll,pitch,yaw <±1°/sec	
Barometer			±2m (Druckänderung bei Flug)	

Tabelle 1: Eingesetzte Sensoren

Die Sensordatenfusion in der Fluglageregelung ist durch einen erweiterten Kalman-Filter (EKF) realisiert. Aus Gewichts- und Kostengründen können für diesen Zweck auf solchen Plattformen lediglich MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) IMU-Systeme geringer Qualität und GPS-Navigationsempfänger mit der Möglichkeit für eine differentielle Code-Lösung verwendet werden. Die Qualität dieser Sensoren erlaubt die Stabilisierung sowie die autonome oder benutzergestützte Navigation der Plattform. Für die Georegistrierung der Videodaten können die Fluglageparameter direkt verwendet werden, jedoch hängt die erreichbare Genauigkeit direkt von der Qualität der auf der Trägerplattform verfügbaren Sensoren ab.

Für die Videodatenerfassung wird auf dieser Plattform eine handelsübliche nicht-metrische SONY FCB-EX780BP Kamera eingesetzt. Diese Kamera liefert ein analoges PAL-Videosignal, welches mittels analogem Video-Daten-Link zur Bodenstation übertragen wird. (Abbildung 2)

#### 2.2 Synchronisation Fluglagedaten – Video

Damit ein Video-Stream georegistriert werden kann, müssen die Parameter der äusseren Orientierung der Videokamera kontinuierlich vorliegen. Die Fluglageregelung stellt zu diesem Zweck die Flugtrajektorie sowie die Orientierung der Plattform zeitdiskret mit 5Hz zur Verfügung. Damit für jedes einzelne Videoframe die äussere Orientierung aus den Fluglagedaten abgeleitet werden kann, ist der Video-Stream mit einer Zeitreferenz zu ergänzen, welcher in Bezug zu den Daten aus der Fluglageregelung gesetzt werden kann. Folgende Abbildung illustriert das gewählte Konzept zur Integration der Zeitinformation in den Video-Stream.



Abbildung 2: Datenerfassungskonfiguration und Integration Zeitinformation

Wie aus der Abbildung 2 ersichtlich, verwendet sowohl die Fluglageregelung wie auch der Time-Code-Generator, der in das analoge Videosignal die Zeitinformation integriert, als Zeitreferenz GPS-Time und daraus abgeleitet UTC. Der Fehler der Zeitsynchronisation zwischen Fluglagedaten und Videoframe hängt von der aktuellen Genauigkeit der Zeitbestimmung der beiden GPS-Empfänger sowie aus der Übertragung des analogen Videosignals, von der Plattform zur Bodenstation, resultierenden Latenzzeit ab. Der zweite Fehleranteil darf für Einsatzdistanzen solcher Plattformsysteme vernachlässigt werden, da das Videosignal über den analogen Daten-Link mit annähernd Lichtgeschwindigkeit übertragen wird.

### 2.3 Datenerfassung – Projektflüge

Als Grundlage für die Untersuchungen in dieser Arbeit dienen Videodaten, welche mit der oben beschriebenen Zeitsynchronisation im Sommer 2006 in Langenbruck (Kanton Basel-Landschaft) und im Freilichtmuseum Ballenberg (Kanton Bern) aufgezeichnet wurden. Folgende beiden Systemkonfigurationen kamen dabei zum Einsatz:

- Flug 1 (Langenbruck): Positionsupdates der Fluglageregelung mit GPS-Navigationslösung (C/A-Code Lösung)
- Flug 2 (Ballenberg): Positionsupdates der Fluglageregelung mit DGPS-Lösung (differentielle C/A-Code Lösung mit Nutzung einer virtuellen Referenzstation)

Zusätzlich stehen in beiden Projektgebieten vollständige 3D-Landschaftsmodelle des Testgebiets, die im Rahmen von Studentenarbeiten mittels Tachymetrie und Nahbereichsphotogrammetrie erstellt wurden, als Referenz zur Verfügung. Die Genauigkeit der erfassten Gebäudemodelle kann mit 10cm angegeben werden. Die Videodatenaufzeichnung in beiden Testflügen erfolgte mit fester innerer Orientierung sowie fixierter Kameraaufhängung.

## 3 Georegistrierung Videodaten

Die erfassten Videodaten aus den beiden Projektflügen werden mit den in diesem Abschnitt dargestellten Verfahren, der direkten Georeferenzierung sowie der integrierten Georeferenzierung auf ein bestehendes 3D-Landschaftsmodell das im Referenzrahmen WGS84 zur Verfügung steht, georegistriert. Zuerst wird die Kalibrierung der Videokamera und der Sensorkonfiguration aufgezeigt, bevor detailliert die erwähnten Verfahren zur Georegistrierung diskutiert werden.

### 3.1 Kalibrierung

Damit die aufgezeichnete Videosequenz auf ein entsprechendes 3D-Landschaftsmodell georegistriert werden kann, muss die verwendete Videokamera sowie die Anordnung und Ausrichtung der eingesetzten IMU/GPS-Sensoren auf der Plattform vorgängig kalibriert werden.

### 3.1.1 Innere Orientierung Videokamera

Für die Schätzung der inneren Orientierungsparameter der Videokamera kommt eine On-the-job-Kalibrierung direkt im Projektgebiet zum Einsatz. Als räumliches Testfeld wird ein Gebäudemodell aus dem 3D-Landschaftsmodell mit zusätzlich am Boden angebrachten Messmarken verwendet. Idealerweise wird dafür ein Objekt ausgewählt, welches einen möglichst grossen Tiefenunterschied aufweist, und sich auf den gesamten Bildausschnitt ausdehnt. Aus ausgewählten Einzelbildern kann anschliessend die unbekannte innere Orientierung mit Hilfe einer Bündelblockausgleichung mit zusätzlichen Parametern geschätzt werden. Eine optimale Anordnung der Einzelbilder über dem Testfeld ist aus (LUHMANN, 1999) zu entnehmen.

Die Schätzung der gesuchten Parameter der inneren Orientierung (einfaches Lochkameramodell) erfolgte mit dem Programmsystem Australis der Firma Photometrix Pty Ltd. Für die anschliessende direkte Georeferenzierung wurden bei der Schätzung der Kammerkonstante die Koordinaten der Projektionszentren aus der Fluglageregelung als hoch gewichtete Beobachtungen mit eingeführt. Damit wird die Kammerkonstante optimal an das aktuelle Höhenniveau der Flugtrajektorie aus der Fluglageregelung angepasst. Im Gegensatz dazu wurde die Kammerkonstante für die integrierte Georeferenzierung ohne zusätzliche Beobachtungen aus reinen Bildbeobachtungen geschätzt.

### 3.1.2 Ausrichtung und Anordnung der Sensoren auf der Plattform

Damit die erfassten Daten aus GPS und IMU auf das Projektionszentrum bzw. auf das Kamerakoordinatensystem bezogen werden können, ist zum einen die Kenntnis der Anordnung der eingesetzten Sensoren zueinander sowie die Verdrehung zwischen Körperkoordinatensystem und Kamerakoordinatensystem Voraussetzung. Die Translation zwischen GPS-Antennenzentrum, Barometer- und IMU-Referezpunkt kann direkt terrestrisch bestimmt werden und wird vom Fluglageregelungssystem mit berücksichtigt. Ebenfalls kann die Translation zwischen IMU-Referenzpunkt und Kameraprojektionszentrum direkt ermittelt werden. Dieser systematische Fehlereinfluss kann jedoch vernachlässigt werden, da dieser mit der nachfolgend beschriebenen Kameraeinbau-Fehlausrichtung stark korreliert ist.

Die Verdrehung zwischen Körperkoordinatensystem und Kamerakoordinatensystem wird zum einen verursacht durch die vom System aufgezeichneten Bewegungen der Kameraaufhängung (Gimbal) bezüglich dem Körperkoordinatensystem sowie der Fehlausrichtung zwischen Kamera-koordinatensystem bezüglich Gimbalsystem. Diese Fehlausrichtung (Misalignment) kann nicht direkt am System gemessen, sondern muss mit Hilfe eines Kalibrierungsflugs geschätzt werden. Mit Hilfe eines Kreuzflugs über ein Testfeld lässt sich die gesuchte Fehlausrichtung mit folgendem Verfahren bestimmen. In ausgewählten Einzelbildern aus der Kreuzflug-Videosequenz werden Bildbeobachtungen auf Passpunkte des Testfelds gemessen. Anschliessend können mit Hilfe einer Gauss-Newton-Optimierung die unbekannten drei Drehungen des Einbaufehlers ( $\Delta \theta$ ,  $\Delta \omega$ ,  $\Delta \psi$ ) in Gleichung 2, aus den zur Verfügung stehenden Einzelbildern, geschätzt werden.

### 3.2 Direkte Georeferenzierung

Unter dem Begriff der direkten Georeferenzierung wird in der Photogrammetrie das direkte Messen der Elemente der äusseren Orientierung für jedes Frame verstanden. Dabei werden die gesuchten Parameter mit Hilfe von IMU und GPS direkt beobachtet. Dieser Ansatz wird beispielsweise in (CRAMER, 2001) detailliert beschrieben. In der Luftbildphotogrammetrie ist dieser Ansatz heute etabliert und untersucht. Jedoch werden in jenen Applikationen im Gegensatz zu dieser Arbeit zur direkten Messung der äusseren Orientierung meist qualitativ hochstehende Sensoren wie *navigation grade* IMU-Systeme und geodätische Zweifrequenz GPS-Empfänger eingesetzt (vgl. HAALA, 2005). Systematische Fehler verursacht durch nicht berücksichtigte Sensor-Shifts zwischen GPS-Antennenphasenzentrum, IMU und Kamera-Projektionszentrum und der Fehlausrichtung zwischen Körper- und Kamerakoordinatensystem sind bei der Auswertung zu berücksichtigen. Die Sensor-Shifts können durch terrestrisches Einmessen direkt bestimmt werden. Im Gegensatz dazu sind die drei Drehwinkel der Fehlausrichtung nicht direkt beobachtbar und können mit dem in Kapitel 3.1.2 dargestellten Verfahren geschätzt werden. (SKALOUD, 1999) enthält eine Zusammenstellung der systematischen Fehlereinflüsse der direkten Georeferenzierung.

In dieser Arbeit wird das Konzept der direkten Georeferenzierung für die Georegistrierung mittels Minidrohnensystemen erfasster Videosequenzen untersucht. Die äussere Orientierung der Videokamera ist durch die integrierten IMU/GPS-Daten aus dem Fluglageregelungssystem durch die in Abbildung 3 illustrierte Transformationen gegeben. Mit der Multiplikation folgender

Teilrotationen kann die gesuchte Gesamtrotation zwischen Kamerakoordinatensystem und Weltkoordinatensystem hergestellt werden.

Dabei besteht die Gesamtrotation aus folgenden einzelnen Drehwinkeln:

- $\Phi$ : geographische Breite (WGS84)
- $\Lambda$ : geographische Länge (WGS84)
- $\theta$ : Pitch (Plattform)
- ω: Roll (Plattform)
- $\psi$ : Yaw (Plattform)
- $\alpha$ : Pan (Gimbal)
- v: Tilt (Gimbal)
- $\Delta \theta$ : Einbauwinkelfehler Pitch
- $\Delta \omega$ : Einbauwinkelfehler Roll
- $\Delta \psi$ : Einbauwinkelfehler Yaw





Mit Ausnahme der drei Drehwinkel die den Einbauwinkelfehler beschreiben, werden sämtliche benötigten Drehungen durch das Fluglageregelungssystem zur Verfügung gestellt. Damit lässt sich die Beziehung zwischen einem Objektpunkt im Weltkoordinatensystem und dessen Abbild im Kamerakoordinatensystem durch die Gleichung

$$\mathbf{x}_{cam} = \frac{1}{\lambda} \cdot \mathbf{R}_{cam}^{wgs\&r} (\mathbf{X}_{wgs\&r} - \mathbf{X}_{0}) \qquad \text{eq. 2}$$

beschreiben. Mit

λ: Massstabsfaktor

x<sub>cam</sub>: Bildpunkt im Kamerakoordinatensystem

X<sub>wes84</sub>: Objektpunkt im Weltkoordinatensystem

X<sub>0</sub>: Projektionszentrum im Weltkoordinatensystem

Das Projektionszentrum der Kamera lässt sich ebenfalls direkt aus der Positionsinformation der Fluglagedaten ableiten. Die gesuchten Elemente der äusseren Orientierung werden anschliessend aus den zur Verfügung stehenden 5Hz Fluglagedaten mit einer linearen Interpolation für jedes Frame der Videosequenz berechnet. Aufgrund der reduzierten Genauigkeit der eingesetzten Sensoren kann das etablierte Konzept der direkten Georeferenzierung nicht ohne entsprechende Anpassungen und Einschränkungen übernommen werden. Speziell die Kalibrierung des Kameraeinbaufehlers und die Handhabung systematischer Fehlereinflüsse ist zu untersuchen und benötigt zur Lösung neue Ansätze und Verfahren.

#### 3.3 Integrierte Georeferenzierung

Im Unterschied zum Ansatz der direkten Georeferenzierung werden bei diesem Konzept, zu den direkt mit IMU und GPS gemessene äusseren Orientierungselemente, Bildmessungen auf bekannte Passpunkte zur bestmöglichen Bestimmung des Sensormodells mit verwendet. Mit Hilfe von zusätzlichen Bildmessungen auf bekannte Passpunkte sollen verbleibende nicht berücksichtigte systematische Fehler der direkten Georeferenzierung korrigiert werden. In (HAALA, 2005) und (CRAMER, 2001) werden die Verfahren streifenweiser Integrationsansatz und Orientierungsbildansatz für die integrierte Georeferenzierung beschrieben. Jedoch eignen sich beide Ansätze für die Daten in dieser Arbeit aus unterschiedlichen Gründen nur bedingt. Nachfolgendes Konzept beschreibt kurz den in dieser Arbeit gewählten Ansatz.



Abbildung 4: Konzept Datenintegration integrierte Georeferenzierung

Grundsätzlich soll der Fehler in den Fluglagedaten mit Hilfe von unabhängig bestimmten äusseren Orientierungselementen bestmöglich geschätzt und entsprechend korrigiert werden. Mit Hilfe von Bildmessungen in ausgewählten Einzelbildern aus der Videosequenz auf Objektpunkte aus dem 3D-Landschaftmodell, lassen sich die Elemente der äusseren Orientierung mit Hilfe eines räumlichen Rückwärtsschnitts unabhängig bestimmen. Mit Hilfe eines diskreten Kalman-Filters, wird für die aus der Fluglageregelung mit hoher Frequenz zur Verfügung stehenden Parameter der äusseren Orientierung, mit den zusätzlich bestimmten Rückwärtsschnitten ein entsprechendes Fehlermodell geschätzt. Abbildung 4 verdeutlicht die gewählte Datenintegrationsstrategie in der vorliegenden Arbeit. Das gewählte Design basiert auf dem komplementären feedforward Kalman-Filter. Der Zustandsvektor enthält die systematischen Fehleranteile der Fluglagedaten sowie deren ersten Ableitungen. Zusätzlich ist der Fehler der photogrammetrisch bestimmten äusseren Orientierungselemente enthalten. Die Systembeobachtungen für einen Update berechnen sich aus der komponentenweise gebildeten Differenz zwischen den aus Rückwärtsschnitten geschätzten äusseren Orientierungselementen und den als Referenz verwendeten Fluglagekomponenten. Die Systembeobachtungen stehen funktional mit den Komponenten des Zustandsvektors, aus der Addition der systematischen Fehleranteile der Fluglagedaten mit den Fehlern der äusseren Orientierungselemente geschätzt aus Rückwärtsschnitten, zusammen. Die Systemdynamik beschreibt für die Fehler der Fluglagedaten einen integrierten Random-Walk und für die Fehler der Elemente der äusseren Orientierung aus den Rückwärtsschnitten einen stark gedämpften Gauss-Markov-Prozess. Das gewählte stochastische Modell gewichtet die Systembeobachtungen im Vergleich zum dynamischen Modell stark. Detaillierte Informationen über das implementierte Filterdesign finden sich in (BROWN, 1983).

## 4 Erreichte Resultate

Die in diesem Kapitel präsentierten Resultate basieren auf den Daten der in Abschnitt 2.3 beschriebenen Testflüge. Für den Nachweis der erreichten Georegistrierungsgenauigkeit werden ausgewählte Checkpunkte aus dem 3D-Landschftsmodell verwendet. Die ausgewiesene Georegistrierungsgenauigkeit im Bild- bzw. Objektraum ergibt sich aus der Rückprojektion (vgl. Gl. 2) der Checkpunkte in ausgewählte Einzelbilder der Videosequenz, mit den Parametern der äusseren und inneren Orientierung. Damit eine unabhängige Beurteilung der einzelnen Datenerfassungs- und Auswertekonfigurationen möglich ist, werden Videosequenzen aus den Testflügen verwendet, die nicht in Zusammenhang mit dem Testfeldobjekt und der Kalibrierung der Einbauwinkelfehler stehen. Für den Genauigkeitsnachweis der integrierten Georeferenzierung werden Einzelbilder verwendet, die zwischen den Rückwärtsschnitt basierten Kalman-Filter Updates liegen.

### 4.1 Genauigkeiten

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die erreichten Georegistrierungsgenauigkeiten für folgende Datenerfassungs- und Auswertekonfigurationen:

- a Fluglagedaten basieren auf GPS-Navigationslösung (C/A-Code Lösung), IMU und Barometer. Georegistrierung mit dem Ansatz der **direkten Georeferenzierung**. (Projektflug Langenbruck)
- b Fluglagedaten basieren auf DGPS-Lösung mit virtueller Referenzstation (Korrekturdatendienst: swipos/NAV swisstopo), IMU und Barometer. Georegistrierung mit dem Ansatz der direkten Georeferenzierung. (Projektflug Ballenberg)
- c Fluglagedaten basieren auf DGPS-Lösung mit virtueller Referenzstation (Korrekturdatendienst: swipos/NAV swisstopo), IMU und Barometer. Georegistrierung mit dem Ansatz der integrierten Georeferenzierung mit ~1Hz Kalman-Filter Updates. (Projektflug Ballenberg)

### 4.2 Beurteilung und Potential

Abbildung 5 illustriert die Georegistrierungsgenauigkeit der Ansätze direkte und integrierte Georeferenzierung (Konfiguration **b2** und **c**) für die gleichen Einzelbilder der Videosequenz. Eindeutig kann die in Tabelle 2 nachgewiesene signifikant verbesserte Georegistrierungsgenauigkeit der integrierten gegenüber der direkten Georeferenzierung anhand der Differenzvektoren zwischen den manuell durchgeführten Bildmessungen und den rückprojezierten Checkpunkten visualisiert werden. Auffallend im Differenzvektorbild der direkten Georeferenzierung ist ein verbleibender, trotz Kalibrierung und Berücksichtigung des Kameraeinbauwinkelfehlers, nicht korrigierter systematischer Fehleranteil. Zudem ist die erreichte Genauigkeit verglichen mit dem resultierenden RMS aus der Kalibrierung des Einbauwinkelfehlers um den Faktor zwei geringer. Diese Resultate stützen die Annahme, dass beim eingesetzten Verfahren zur Kalibrierung des Einbauwinkelfehlers hauptsächlich zeitlich korrelierte systematische Fehleranteile der Fluglagedaten aus GPS/IMU kompensiert und nicht die gewünschten Einbauwinkelfehler geschätzt werden. Eine Erklärung für diesen Effekt liefert die hohe Korrelation zwischen einem systematischen Fehler in den Elementen der äusseren Orientierung und den drei Drehungen die den Einbauwinkelfehler beschreiben. Auch das Differenzvektorbild bestätigt diese Aussage, da im analysierten Ausschnitt der Videosequenz ebenfalls ein zeitlich systematischer Fehleranteil in den Fluglagedaten vorliegt, der aber nicht mit den aus der Kalibrierung geschätzten Einbauwinkelfehlern kompensiert werden kann.

Die ausgewerteten Testflugdaten zeigen im Weiteren die Georegistrierungsgenauigkeit auf, die mit dem Ansatz der direkten Georeferenzierung, mit dem eingesetzten Minidrohnensystem erreicht werden kann. Die Resultate der Testflüge (Konfiguration **a** und **b**) zeigen, dass die Nutzung von Pseudorange-Korrekturen lediglich eine minimale Verbesserung der direkten Georeferenzierung zur Folge hat. Hauptsächlich kann mit der DGPS-Konfiguration die absolute Genauigkeit der Vertikalkomponente der Projektionszentren signifikant gesteigert werden. Jedoch kann mit angepasster Schätzung der Kammerkonstante, bei gleich bleibender Objekt-distanz über die gesamte Flugmission, ein vorhandener Höhenshift in der Vertikalkomponente grösstmöglich kompensiert werden. Möchte die Genauigkeit der direkten Georeferenzierung signifikant verbessert werden, müssen neue Ansätze, wie der in diesem Beitrag aufgezeigte Ansatz der integrierten Georeferenzierung für die Prozessierung der Daten, verwendet werden. Dieser Ansatz ermöglicht mit Hilfe des 3D-Landschaftsmodells eine fortlaufende Schätzung und Kompensation des systematischen Fehlers der äussern Orientierung und behandelt darin Einbauwinkelfehler und systematische Fehler der Fluglagedaten als stark korrelierter einziger Fehlerterm.

	Konfiguration a	Konfiguration b1	Konfiguration b2	Konfiguration c
	Fehlausrichtung berücksichtigt		Fehlausrichtung berücksichtigt	
Bildmassstab	1:32'000	1:16'000	1:16'000	1:16'000
RMS Bildraum	114.1 µm	144.12 µm	119.4 µm	35.3 µm
Objektdistanz	100 m	50 m	50 m	50 m
RMS Objektraum	3.8 m	2.4 m	2.0 m	0.59 m

Tabelle 2: Erreichte Genauigkeiten Georegistrierung



Abbildung 5: Differenzvektoren in der Bildebene direkte- vs. integrierte Georeferenzierung

## 5 Ausblick und Anwendungen

Künftig soll die bis anhin manuell durchgeführte Bildmessung auf Objekte aus dem 3D-Landschaftmdoell in den Einzelbildern der Videosequenz mit Hilfe geeigneter Bildzuordnungsverfahren sowie Objektverfolgungsalgorithmen automatisiert werden. Im Endausbau sollen die aufgezeigten Verfahren der direkten sowie integrierten Georeferenzierung für Echtzeitanwendungen zur Verfügung stehen.

Ein solches Mini- oder Mikrodrohnensystem ausgerüstet mit Videokamera könnte als mobiles Echtzeit-Kartierungssystem eingesetzt werden. Eine solche Systemlösung würde es erlauben, die erfassten Videodaten direkt in ein 3D-Geoinformationsdienst zu integrieren. Denkbar ist zum einen das "aufmappen" der erfassten Texturinformation aus den Videodaten direkt auf das Terrain des 3D-Landschaftsmodells. Ebenfalls könnte der georegistrierte Video-Stream mit beliebigen Informationen aus dem 3D-Landschaftsmodell überlagert werden. Damit lassen sich auf einfache Weise beliebige Geoobjekte kartieren wie auch über eine Video-Sequenz verfolgen. Denkbar ist eine Anwendung in welcher der reale Zustand mit einem Modellzustand verglichen werden kann. Hilfreich könnte ein solches System, z.B. bei der schnellen und effizienten Erfassung und Beurteilung eines Schadensbildes nach einer Naturkatastrophe, eingesetzt werden.

## 6 Zusammenfassung

Dieser Beitrag untersucht die Georegistrierung mittels Minidrohnensystem erfasster Videosequenzen. Die Georegistrierung erfolgt aufgrund der zur Verfügung stehenden Fluglagedaten geringer Qualität mit dem Ansatz der direkten Georeferenzierung sowie der integrierten Georeferenzierung. Beim Ansatz der direkten Georeferenzierung hängt die Genauigkeit direkt von den auf der Plattform zur Fluglageregelung eingesetzten GPS, IMU und Barometer Sensorsystemen ab. Aufgrund Testflugdaten, erfasst mit einem Minidrohnensystem, konnte eine Georegistrierungsgenauigkeit von 2 bis 4m aus einer Aufnahmehöhe von 50 bis 100m nachgewiesen werden.

Möchte die Genauigkeit signifikant gesteigert werden, müssen neue Verfahren wie die in diesem Beitrag präsentierte integrierte Georeferenzierung weiterentwickelt und eingesetzt werden. Dieser Ansatz nutzt zusätzlich zu den direkt durch IMU und GPS gemessenen Fluglageparametern zur Georegistrierung photogrammetrisch geschätzte äussere Orientierungselemente. Erste Resultate zeigen auf, dass die Georegistrierungsgenauigkeit um den Faktor vier gesteigert werden kann. Wird zusätzlich berücksichtigt, dass die dafür benötigten äusseren Orientierungsupdates aus automatisch durchgeführten Bildmessungen im Video-Stream berechnet werden, ist eine Georegistrierungsgenauigkeit in der Grössenordnung von 1m realistisch. Diese Genauigkeit ist für viele neue Anwendungen ausreichend, welche mit kostengünstigen Mini- oder Mikrodrohnensystemen realisiert werden können.

## 7 Danksagung

Diese Arbeit wird von der schweizerischen Förderagentur für Innovation KTI finanziell mitunterstützt. Weiter bedankt sich der Autor bei der Firma weControl (Dübendorf, Schweiz) für die gute Zusammenarbeit bei der Durchführung der Projektflüge.

## 8 Literaturverzeichnis

BROWN, R. & HWANG, P., 1983: Introduction to random signal analysis and Kalman filtering. John Wiley & Sons, Inc., New York, pp.392-418.

CRAMER, M., 2001: Genauigkeitsuntersuchungen zur GPS/INS-Integration in der Aerophotogrammetrie. Dissertation, Universität Stuttgart.

HAALA, N., 2005: Multi-Sensor-Photogrammetrie. Habilitation, Universität Stuttgart.

- LUHMANN, T., 1999: Nahbereichsphotogrammetrie Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 495-501.
- SKALOUD, J., 1999: Problems in Direct-Georeferencing by INS/DGPS in the Airborne Environment. ISPRS Workshop on 'Direct versus Indirect Methods of Sensor Orientation' WG III/1, Barcelona 25-26, 1999.
# GPS/IMU and LiDAR integration to aerial photogrammetry: Development and practical experiences with Helimap System<sup>®</sup>

JULIEN VALLET<sup>1</sup>

### 1. Introduction

The arrival during the 90's of the direct georeferencing technologies (GPS-inertial) and laser altimetry, combined to the emerging high resolution digital imagery, changes drastically the world of aerial photogrammetry. Those techniques widened the application field of airborne mapping: remote area mapping, corridor mapping, fast delivery mapping.

Nevertheless, the commercial "high-tech" products, available on the market, focused essentially on large area mapping and nothing was designed for "local" applications and especially for complex terrain or vertical objects. Generally operated from fixed-wing aircrafts, looking downward mapping systems are not suitable for cliffs or steep slopes for example.

It is now a fact; there is a huge demand for high precision mapping of small surface, where expensive commercial mapping system does not suit either in terms of economical or practical point of view.

Development of Helimap System® started in 1999 in the photogrammetric and geodetic laboratories of EPFL, to address needs for natural hazard mapping (Vallet 2002) in collaboration with the Swiss federal institute For Snow and Avalanche Research of Davos. The requirements were accurate data (<15cm), short notice setup, low cost and high flexibility for complex terrain and steep slopes.

Based at the beginning on handheld analog photogrammetry operated from the side of a helicopter, the system progressively integrated GPS positioning, GPS-INS georeferencing, high resolution CCD camera and finally a laser scanner unit. Thanks to its maneuverability, the system provides high precision (~0.1m) and high density (>2-3 post/m<sup>2</sup>) digital terrain/surface model (DTM/DSM) and high resolution orthoimagery (GSD<0.1m) either in "standard" nadir or oblique configuration.

Since 2005, Helimap System® is commercially exploited by Helimap System SA a subsidiary of Ulrich, Wiesmann + Rolle AG in all types of land management project (power lines, cliffs, avalanche, roads, railroads, landslide...), but always focused on small area (<2000ha).

All those practical experiences led in the past 3 years gave an important feedback and allowed fine tuning of the system either in operational phase or processing phase. Direct georeferencing and LiDAR measurements change drastically the airborne mapping process in positive aspects automation, high resolution but also add complexity and gaps to avoid. Thus, those several flights pinpoint the importance of the calibration step and especially the digital camera calibration stability, the procedure of alignment, and the necessary periodical ground control. The last important issue of our practice is that the imagery should never be neglect! It is the backup for everything.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Helimap System SA, CH-1066 Epalinges E-mail: vallet@helimap.ch

## 2. System development

#### 2.1. Concept

The design of the system is based on 6 crucial points:

- Flexibility of flight capability. The helicopter is the only aircraft offering enough flexibility in terms of flight.
- Get a constant mapping accuracy whatever the slope: the accuracy of nadir airborne mapping device (photogrammetry, LiDAR) decreases as the slope angle grows. To prevent this effect, the mapping device is rotated until the slope looks flat. The fact that the system is handhold confers a free motion and orientation to the sensor (fig. 1). It allows using the system either vertically or obliquely during the same flight (fig. 2).



Figure 1: Basic concept of Helimap System®: a handheld operation to fit to the ground



Figure 2: vertical (nadir) and oblique operation of the system

- Be able to make remote mapping over inaccessible or dangerous area, by suppressing the constraints of Ground control points (GCP's). This is achieved by integrating direct georeferencing techniques (GPS-INS).
- Be operational on a very short notice independently of the carrier. Most commercial system requires complex installation in the aircraft. By preventing any fixed mount to the helicopter, the system can be deployed within an hour on any type of helicopter.

- Get a single calibration system. Classical system considers their sensors separately during the installation (GPS, Camera-INS, Lidar-INS). Each time the system is installed/uninstalled; offsets between sensors must be controlled. By building a single rigid block integrating all sensors, the system needs to be calibrated only one time.
- Provide results quickly on any type of surface: thanks to LiDAR measurements, the time consuming step of stereoplotting is replaced by the automated generated point cloud. The poor contrast surfaces like snow or sand or poor stereoscopic vision area like forests are treated like other surface with the same accuracy.

#### 2.2. Components

To address the previous requirements, the system incorporates a modular design with off-theshelf sensors and modern communication to facilitate replacements or upgrade. The 4 following sensors:

- CCD camera with 22 mega pixels chip and 35mm lens with FOV of 57°
- Riegl 2D airborne scanner with a measurement rate of 10'000 post/sec, a max operating range of 300-400m and a FOV of 60° compatible with the camera. The wave length of 900 nm ensures favorable reflection even on snow surfaces. Only water and pure ice reflects poorly.
- GPS/GLONASS antenna, linked to carrier phase receiver
- Tactical grade IMU with 500Hz measurement rate

composed the system and are assembled with a carbon-aluminum frame (fig. 3).

This compact block provides complete rigidity between sensors and lightweight (12 kg) permitting its handheld operation. The installation time is minimal (~30 minutes) and does not require modification of the helicopter. No re-calibration is needed as long as the components are not disassembled.

Data acquisition module (DAM) is composed of custom hardware interfaces, power supply unit, GPS receiver and PC that ensures instrument command, data synchronization and storage. The system is linked to the DAM via sets of strong shielded cables and MIL connectors. Pilot navigation is also ensured by the DAM.



Figure 3: Helimap System® with components

#### 2.3. Data flow

The figure 4 illustrates the coarse data flow from the sensors to the final products (DTM/DSM, orthoimage). GPS trajectory is firstly computed and then integrated to IMU measurements to provide position and orientation for camera shots and laser measurements. Laser data are manually separated in flight lines and then processed trough LiEO to generate point's clouds. A laser filtering software allows the separation of the DTM/DSM.

The GPS-INS derived exterior orientation of the images, computed with CamEO, is imported in the photogrammetric software. Then two options are offered, computing orthoimage with direct georeferencing parameters and laser DTM, or processing an automated aerial triangulation (AT) to improve accuracy and remove residual parallaxes. The AT step is necessary if stereoscopic measurements are done.



Figure 4: Direct georeferencing data flow for the orthoimage and DTM/DSM production

## 3. System calibration

System calibration is divided in two major steps, lever arm and boresight. The lever arm represents the spatial offsets (vector) between sensors origin (GPS-IMU, GPS-CAM, ALS-IMU). Its determination is achieved with sub-centimeter level by tacheometric measurement.

The boresight characterizes the misalignment of the respective reference frame between IMU and CCD/LiDAR due to the mechanical imperfections of the mounting. The determination of the both boresights is performed on flight with different procedures.

The CCD-IMU misalignment is extracted from a GPS aided AT with a set of GCP's. Misalignment angles are computed with an accuracy of 0.008°. During this flight the interior orientation parameters of the camera are determined (AT-GPS bloc adjustment). However, focal length and principal point (PP) of actual medium format CCD camera are not so stable. By using regularly few control points on production flights, it is possible to check the stability. As it

depends on temperature and submitted level of vibration endured by the camera, a variation of  $\sim$ 30µm for focal length and  $\sim$ 15µm for PP has been observed over one year.

The LiDAR-IMU boresight requires a special flying pattern over selected features. The popular empirical technique uses cross sections to determine the offset between two flight lines (same line but opposite direction). This technique provides satisfactory results for the boresight estimate in the roll direction while the pitch and heading is badly estimated. Then a new approach was designed (Skaloud and Lichti, 2006) by expressing the boresight within the direct-georeferencing equation of each laser point and constraining a group of points to lie on common plane surface (using roof). This approach gave adjustment of the flight lines within the internal accuracy of the laser distance measurements (0.03m).

## 4. Practical experiences

Helimap System<sup>®</sup> entered in production since the end of 2004. During 3 years, more than 60 flights were realized giving enough feedback to make the system evolving.

#### 4.1. Application field

Helimap System<sup>®</sup> was designed for small area mapping (between 10 and 2000 ha) or medium corridor (<100km). The good synergy between the camera and the LiDAR properties give the system suitable complementary information.

Along those many flights, we cover the following application fields (fig. 5)

- Corridor mapping : railroad mapping, power lines planification and control in mountains area, highway mapping and high accuracy profile determination (accuracy of 2-3cm), coast mapping
- Forestry : inventory, settlements, damage
- Natural hazards: avalanche monitoring, snowmelt study, landslide, rock fall... (fig. 5)
- Glaciology : mass balance of small glacier
- Gravel pit and open mines for volumetry control
- Land management and site rehabilitation (urbanism, construction)
- Cliff mapping for geology studies





Figure 5: Power lines mapping (a). By flying at 100m above ground, it is possible to detect wires, pylons. Steep slopes mapping (Grimsel-Furka road) for 3D road model (b). Orthophoto draped on DSM (c)/DSM (d) / DTM (Laser filtering) of railways (SNCF) (e) / Snow volume measurement of a slab avalanche (vallée de la Sionne, VS) (f).

#### 4.2. Output data quality

The basic data issued for Helimap System® are high density digital terrain/surface models (density of 1-20 pts/m<sup>2</sup>), high resolution orthoimages (GSD of 3 to 10 cm) and accuracy stereo

plotting (breaklines, features) to complete the DTM/DSM laser model. Then all derived output data can be extracted from it (volume, object classification...).

The output data quality check is an important task when using DG based system. For several flights, GCP's were measured to estimate the accuracy of the system. All operation modes (photogrammetry, LiDAR, oblique, nadir) were evaluated to finally give the performance of the system. The operating height was ~300m, i.e. 1:9'000 scale imagery.

Another specific test was recently done to estimate the potential of reaching 1-2cm accuracy level with airborne solution (flight height of 40-60m)

It can be characterized according 3 aspects:

- Imagery: the gain brought by the digital images related to analog film, 4x less noise, 3x sharper. This fact permits to reduce the image scale by a factor 2 without any loss of image details (Vallet et al. 2004).
- Photogrammetric mapping accuracy: the 3 different ways of orientation were explored, the standard AT with GCP's, the AT-GPS without use of GCP's and the AT with DG (no GCP's). Figure 7 depicts the results in terms of accuracy. We can notice that the mapping accuracy without GCP's is better when using AT-GPS approach. So what would be the advantage of DG-AT? The main constraint of AT-GPS is that it requires at least 2 flight lines overlapping otherwise the roll is very unstable. Then, this technique is not usable for corridor. The second advantage of DG-AT is the quasi full automation of the tie points transfer (only forest areas remain problematic and requires manual editing), while it is not the case with AT-GPS, especially if working with oblique images. The use of DG without AT is also possible but the experiences shows that residual parallaxes make impossible accurate stereo measurements and create disjuncture within the mosaic (5-20cm). Then for precise purpose, AT is strongly recommended.

The test conducted for high accuracy purpose (centimeter level) reveals the high potential of the method. By flying at 50m above roads it was possible to achieved stereoplotting with maximum residuals better than 0.02m while the RMS of GCP's residuals is ~0.004 m (fig. 6). The price to pay to achieve this precision level is GCP's measurements with sub-centimeter accuracy. The DG is only used to automate the AT process.



Figure 6: Stereo plotting residuals on road profiles

LiDAR mapping accuracy : The accuracy of the LiDAR was estimated according two 3 level, the inner accuracy that characterized the noise inside the point cloud, the relative accuracy that is the discrepancies between several overlapping flightlines and finally the absolute accuracy, estimated by GCP's (Škaloud et al. 2005). The figure 7 illustrates the results for relative and absolute accuracy according to the type of surface. The noise has

been measured on flat roads at different flight height and appears to be identical (~0.03m) (fig. 8).







Figure 8: Residual noise on a flat road

Due to the inner noise of the laser measurements, it is impossible to achieve an absolute precision better than 3 cm (if we assume that the trajectory is error free...). By flying at 50m height above roads, we confirm this idea: Without shift adjustment on GCP's, there is no way to get the altimetry better than 6cm. By adjusting the point cloud and using a smoothing filter (decrease point density by computing key points), it is possible to reach the noise level (tab. 1).

	Point number	Max resid [m]	Average [m]	Std deviation [m]	RMS [m]		
40m	524'355	0.094	0.034	0.030	0.045		
40m smooth 1cm	219'693	0.104	0.035	0.030	0.045		
40m smooth 5cm	31'509	0.099	0.038	0.027	0.047		
60m	652'821	0.106	0.056	0.025	0.061		
60m smooth 1cm	311'343	0.106	0.056	0.025	0.062		
60m smooth 5cm	34'657	0.111	0.057	0.027	0.063		
Altimetric adjustment							
40m smooth 1cm	219'693	0.064	0.005	0.030	0.030		
60m smooth 1cm	311'343	0.051	0.006	0.025	0.025		

Table 1: Altimetric residuals of laser point cloud on GCP's. Smoothing filter have been applied to estimate the noise removal potential

#### 4.3. Practical recommendations

60 helicopter flights brought lots of experiences and teach us a lot of useful practical recommendations to follow.

The calibration step is one of the crucial point because the final mapping accuracy will depend on it. The lever arm is the less sensitive because it propagates the error only in translation. The boresight is more critical because errors propagate with distance to ground. Once the calibration is performed, the experience shows that the IMU-LiDAR boresight is quite stable (depends only of the rigidity of the assembly) while the camera-IMU boresight might be strongly affected by the inner orientation stability. Thus, it is extremely important to regularly check the inner orientation parameters of the camera. Usually medium size CCD camera is composed of a body separated from the digital back. While the back keeps its removal function (for cleaning CCD), it will be hard to guaranty a perfect stability of the PP. The focus must be set on the immobilization of the package back-body-lens. The temperature and vibration also affects the focal length and PP. To prevent from making errors in image processing, there is a way to have inner control to detect problems: comparing laser measurement with stereoscopic view of the image. If only a systematic shift in altimetry is observed, it is possible to correct only the focal length without GCP's to fit both together but it is rarely the case. Usually, PP and focal can move and then only few GCP's and aerial triangulation can recover a correct inner orientation. In 30 flights, we noticed that the calibration of the camera changes by period (temperatures, sensors maintenance, shocks) in a range of 30um for focal and 15um for PP.

Regularly, we measures 5-10 GCP's on a part of the area and check the calibration there. It is extremely recommended for high accuracy purpose.

The second important aspect is the GPS quality. As the entire computed GPS-IMU trajectory depends on the GPS processing, it is crucial to plan the flight in favorable satellites constellation especially in mountains area or when flying at low height. Thus, it is relevant to compute satellite visibility by taking into account terrain obstructions.

The final tip concerns the redundancy of the acquired data. Integrating photogrammetry and LiDAR provides redundancy. It would be pity not to use it. As systems become more and more complex, the reliability of all sensors can not been guarantied at 100%, even with expensive commercial system. Then it is interesting to think in terms of "back-up" data. The imagery is the best back-up while it is possible to reconstruct everything from it.

## 5. Outlooks

Helimap System<sup>®</sup> is not a frozen system. Practical experiences lead to evolution of it. The system is currently operational and provides accurate results within the 10-15 cm accuracy level with the unique capability to map flat or vertical areas with the same resolution and precision. Its fast setup allows deploying it within hours. Respecting certain recommendations ensures reliability in the quality of the data.

The current development focused on more ergonomic pilot navigation software and on more compact and integrated data acquisition module. Future investigation will direct in the possibility of using it in other aircraft (motorized parasail for example) or for terrestrial kinematic applications (boat, truck).

## Acknowledgment

We strongly thank Dr Jan Skaloud and the geodetic lab of EPFL for continuing supporting the development of Helimap System<sup>®</sup>. We also thank the Prof. Kilchoer of the HES-SO Fribourg for his involvement in the navigation project.

## References

- SKALOUD J., LICHTI D., 2006: Rigorous approach to bore-sight self-calibration in airborne laser scanning, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 61 (2006) 47–59.
- SKALOUD J., VALLET J., KELLER K., VESSYERE G. AND KÖLBL O., 2005: Helimap System<sup>®</sup>: Rapid large scale mapping using handheld LiDAR/GPS/INS/CCD sensors on helicopters. ION GNSS 2005 Congress. Long Beach CA.
- VALLET J., SKALOUD J., 2004: Development and Experiences with A Fully-Digital Handheld Mapping System Operated From A Helicopter, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istanbul, Vol. XXXV, Part B, Commission 5.
- VALLET J., 2002 : Saisie de la couverture neigeuse de sites avalancheux par des techniques aéroportées. Thèse EPFL N° 2610.

## Photogrammetrische Erfassung von Fliess- und Staublawinen mit digitalen Amateur-Kameras

#### PATRICK WICKI<sup>1</sup> & LUCINDA LARANJEIRO<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Eine wesentliche Komponente beim Studium des dynamischen Verhaltens von Fliess- und Staublawinen ist die Kenntnis der Dimension, Form, Entwicklung und Geschwindigkeit realer Lawinen. Die dynamische Photogrammetrie kann den Forschern genau diese Produkte liefern und ist darum eine wichtige Technik zur Erfassung von Lawinen.

In diesem Artikel werden die Arbeitsschritte von der Bildaufnahme im Feld bis zum fertigen Produkt aufgezeigt. Es wird beschrieben, welche technischen Hilfsmittel verwendet werden und welche Informationen aus den gewonnenen Daten extrahiert werden können. Als Fazit werden die Möglichkeiten zur Steigerung der Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit des Projekts im Rahmen unserer finanziellen Mittel aufgezeigt. Es ist uns bewusst, dass ein erhöhter finanzieller Aufwand auch die Qualität der erhobenen Daten steigern könnte.

#### 1 Einleitung

Seit knapp 10 Jahren werden im schweizerischen Lawinenversuchsgelände im Vallée de la Sionne (Landeskoordinaten 595000/127000) vom Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) Experimente mit künstlich ausgelösten Lawinen durchgeführt. Die aus den Experimenten gewonnenen Daten dienen dem Studium des dynamischen Verhaltens von Fliess- und Staublawinen und dem Bestimmen der Kräfte, die beim Aufprall von Lawinen auf Hindernisse entstehen. Mit verschiedenen Messverfahren (Radar, optische Korrelationssensoren, Photogrammetrie, Videogrammetrie) werden Daten erfasst, welche in die Verifizierung und Kalibrierung physikalischer Modelle und numerischer Computermodelle einfliessen <sup>1</sup>.

Die Frage, was eine Staublawine physikalisch genau ist und wie sie entsteht, beschäftigt die Lawinenforschung nach wie vor. Um diese Frage zu beantworten, ist es von grossem Interesse zu wissen, wie sich die Staubwolke einer Lawine entwickelt, wie sie ihre Position, Form und Grösse im Verlaufe der Zeit verändert und wie sie Energie aufnimmt und wieder abgibt.

Diese Informationen können aus den photogrammetrischen Auswertungen der Lawine gewonnen werden: Die Auswertungen der vor und nach dem Lawinenniedergang aufgenommenen Luftbilder des Anriss- und Ablagerungsbereichs dienen der Bestimmung der verfrachteten Schneevolumina und der Messung der Anrisshöhen entlang der Anrisskanten. Die Auswertung der terrestrischen Bilder, welche während dem Lawinenniedergang aufgenommen werden, dienen der Messung der Frontlinien der Lawinen, der Ermittlung von Fliessgeschwindigkeiten und -volumina und der Extraktion digitaler Oberflächenmodelle während ausgewählter Zeitschnitte des Lawinenniedergangs<sup>4</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Eidg. Forschungsanstalt WSL, Zürcherstr. 111, 8903 Birmensdorf E-Mail: <u>patrick.wicki@wsl.ch</u>, E-Mail: lucinda.laranjeiro@wsl.ch

Die terrestrischen Bilder wurden früher mit Videokameras vom Typ Sony DCR-TRV-900 aufgenommen. Um die Qualität der gewonnenen Daten zu verbessern, wurden die Videokameras ab dem Winter 2004/05 durch synchron ausgelöste, digitale Photokameras mit einer höheren Auflösung ersetzt. Mit dieser Aufnahme-Konfiguration konnten in den vergangenen drei Wintern insgesamt fünf Lawinen-Ereignisse aufgenommen werden. Vier dieser fünf Ereignisse wurden photogrammetrisch ausgewertet.

## 2 Verwendete Hardware

Für die Aufnahmen werden zwei Kameras vom Typ Canon EOS 20D verwendet. Diese digitale Spiegelreflexkamera verfügt über ein robustes Gehäuse, einen 8.2 MP CMOS-Sensor (3504 x 2336 Pixel), exzellente Serienbildeigenschaften und funktioniert laut Angaben des Herstellers bis -40°C. Als Objektiv wurde das EF-S 18-55 mm gewählt, welches im Set mit der Kamera erhältlich war.

Für die Synchronisierung der Kameras bot Canon kein Produkt an, welches den Anforderungen (Schwankung der Intervalllängen < 1/100 sec, Differenz der Auslösezeit zwischen den Kameras < 1/100 sec) genügte. Darum wurde an der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) eine elektronische Steuerung gebaut, mit der zwei Kameras über Kabel, welche am Adapter des Fernauslösers angeschlossen werden, in 1 oder 2 sec-Abständen synchron ausgelöst werden können.



Abbildung 1: Die für die Aufnahmen verwendete Hardware.

Kernstück der Steuerung ist ein CMOS RC Timer, die Speisung der Steuerung erfolgt über eine 12 Volt-Batterie. Tests ergaben maximale Schwankungen der Intervalllängen von ca. 3/1000 sec, was den Ansprüchen genügt, legt doch eine Staublawine in dieser Zeit maximal 0.25 m zurück. Die Synchronität der Auslösung wurde mit der Feld-Konfiguration anhand von Bildern einer laufenden, digitalen Stoppuhr überprüft. Dabei konnten im 1/100 sec-Bereich keine Unterschiede festgestellt werden.

#### 3 Aufnahme-Konfiguration

Die Aufnahme-Konfiguration wird im Vallée de la Sionne von den natürlichen Gegebenheiten diktiert. Bedingt durch das unwegsame, bewaldete Gelände auf der Gegenhangseite des Lawinenzuges bieten sich nur wenige Orte als geeignete Kamerastandorte an. Die beiden Photo-Kameras wurden auf den Punkten LA und G3 platziert (siehe Abbildung 2). Mit dem dritten zur Verfügung stehenden Standort BR ergibt sich eine wesentlich längere Basis, aufgrund des grossen Konvergenzwinkels entsteht aber ein schlechter stereoskopischer Eindruck. Von diesem Standpunkt aus wurden darum nur zur Verbesserung der Orientierung des photogrammetrischen Blocks Bilder gemacht. Die Kamera-Standpunkte wurden mit differentiellen GPS-Messungen mit einer Genauigkeit von 5 cm bestimmt.

Durch die Montage der Kameras im Hochformat und die Einstellung der Brennweite auf 18 mm (entspricht 29 mm im Kleinbild-Format) kann das ganze Gebiet auf jeweils einem Bild festgehalten werden. Um bei der Orientierung der Bilder eine Selbstkalibrierung durchführen zu können, wurden vor dem Lawinenniedergang zusätzlich gekantete Aufnahmen gemacht. Bei den Aufnahmen wurde darauf geachtet, dass die beiden Kameras ausser der Blende exakt dieselben Einstellungen aufweisen. Die Auslösung erfolgt im manuellen Modus, um Verzögerungen bei der Auslösung zu vermeiden.



Abbildung 2: Die möglichen Kamera-Standpunkte G3, LA und BR (rot) mit den Visuren ins Anriss- und Ablagerungsgebiet (blau) und dem Gefahrenbereich der Lawine (schwarz). Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA071263).

Der Bildmassstab liegt zwischen 1:140'000 im Anrissgebiet und 1:30'000 im Ablagerungsbereich der Lawine, die Kantenlänge eines Pixels variiert im Objektraum zwischen 0.93 m und 0.21 m. Die Länge der Basis zwischen den Kameras beträgt 240 m, der Abstand zum Objekt zwischen 2600 m und 600 m. Dadurch ergibt sich die ungünstige Aufnahme-Konfiguration mit einem Abstand-Basis-Verhältnis von 1:11 im Bereich des Anrissgebietes.

### 4 Orientierung und Resultate

Die Lawinenereignisse der Winter 2004/05 und 2005/06 konnten jeweils am selben Tag im Abstand von ca. einer Stunde ausgelöst werden. Der gesamte photogrammetrische Bildverband eines Aufnahmetages wurde in einem Block orientiert, wodurch sich für diese beiden Winter je eine Ausgleichung ergab. Im schneearmen Winter 2006/07 herrschten nie ideale Bedingungen, um eine Lawine auszulösen.

Die Standardabweichung der Gewichtseinheit a posteriori liegt bei beiden Blöcken im Bereich von 5  $\mu$ m (1 Pixel = 6.4  $\mu$ m). Die durchschnittlichen Residuen der Stützpunkte (RMS) betragen 1.6 m in der Lage und 1 m in der Höhe. Eine Analyse der mittleren Fehlerellipsen der Stützpunkte zeigt die grösste Ausdehnung in Aufnahme-Richtung im oberen Bildbereich, dem Anrissgebiet der Lawine. Dies ist auf das ungünstige Abstand-Basis-Verhältnis und die damit verbundenen schleifenden Strahlenschnitte zurückzuführen. Die Resultate der Ausgleichung sind aufgrund der schwachen Blockgeometrie und der nicht einwandfreien inneren Orientierung der Kameras mit Vorsicht zu geniessen. Darum wurden mittels Messungen in den orientierten Bildern weitere Genauigkeitsuntersuchungen durchgeführt.

Eine visuelle Nachmessung der Stützpunkte ergab eine Abweichung (RMS) gegenüber den Sollwerten von 5.4 m im oberen Bereich und 2.2 m im unteren Bereich des Lawinenzuges.

Weiter wurden im ganzen Lawinenhang Punkte auf der noch intakten Schneeoberfläche gemessen, deren Höhen mit dem Geländemodell verglichen wurden. Auch hier zeigt sich mit zunehmendem Abstand von den Kameras eine deutliche Abnahme der Genauigkeit.

## 5 Produkte

Der stereoskopisch auswertbare Teil des Lawinenniedergangs dauert je nach Grösse und Geschwindigkeit der Lawine ca. eine Minute. Danach ist die Front nur noch von der Kamera, welche auf G3 (siehe Abbildung 2) platziert ist, einsehbar. Im Normalfall wird alle 5 Sekunden ein Bild ausgewertet, dazu kommen ausgewählte Zeitschnitte im Sekundentakt, wodurch sich zwischen 12 und 20 auszuwertende Stereomodelle ergeben.

Alle Versuche, automatisch ein Oberflächenmodell über die Lawine zu berechnen, sind bis anhin gescheitert. Die Prozesse sind entweder abgestürzt oder haben keine brauchbaren Resultate ergeben. Aus diesem Grund erfolgt die Auswertung der Bilder nach wie vor visuell. Die Operateur-Arbeit ist sehr zeitaufwendig und mit einigen Problemen verbunden: Nebelschwaden, Schatten und die unscharfen Konturen des Staubanteils der Lawinen erschweren das Absetzen der Messmarke auf der Oberfläche. In jedem Stereomodell werden sowohl die Frontlinie (siehe Abbildung 3) als auch die komplette Lawinenoberfläche digitalisiert.



Abbildung 3: Die erste Lawine vom 6. März 2006 inklusive Frontlinie (grün) 60 Sekunden nach der Sprengung. Die blaue Linie dient der Abgrenzung des betrachteten Perimeters.

Aus dieser visuell gemessenen Punktwolke und den Frontlinien der Lawinen wird in einem ersten Prozessierungsschritt für jeden Zeitschnitt ein Oberflächenmodell über die Lawine gerechnet. Aus der Differenz zwischen Oberflächen- und Geländemodell ergeben sich die in Abbildung 4 dargestellten Höhenkarten, wobei die Höhendifferenzen nicht in Lotrichtung, sondern senkrecht zur lokalen Geländeneigung und Exposition gerechnet werden. Als weiteres Produkt kann aus der Differenz zwischen Oberflächen- und Geländemodell das totale Volumen der Lawine inklusive Staubwolke berechnet werden. Diese Zahlen erlauben den Lawinenforschern am SLF, das Volumen des mitgerissenen Schnee-/Luftgemischs zu quantifizieren.

Mit Hilfe der Höhenkarten kann die Entwicklung einzelner Elemente der Lawine studiert werden. Die Kenntnis der Lage, Höhe und Entwicklung der sich an der Oberfläche bildenden Turbulenzstrukturen liefert wertvolle Informationen zur Quantifizierung des zerstörerischen Pulverschnees in der Staubwolke der Lawine.

Dichtegetriebene Strömungen weisen in ihrem Frontbereich eine charakteristische Form auf. Die Form der Oberfläche im Frontbereich der Lawine wird darum mit der theoretisch vermuteten Form verglichen und erlaubt damit Rückschlüsse auf die Korrektheit der theoretischen Hypothesen. Aus diesem Grund wird die Punktwolke im Frontbereich mit einer höheren Punktdichte digitalisiert.

Zur Kalibrierung und Verifizierung der in der Einleitung erwähnten numerischen Modelle wird in erster Linie die Frontgeschwindigkeit benötigt. Diese lässt sich aus der Lage der Front und der Zeitdifferenz zwischen den Aufnahmen berechnen.

Als letztes werden entlang von vordefinierten Linien Längs- und Querprofile gerechnet.

Da die meisten dieser Produkte nicht mit Standard-GIS-Tools erstellt werden können, wurden die Prozesse mittels VBA-Scripts in ArcMap automatisiert.



Abbildung 4: Die Höhenkarte der Lawine vom 6. März 2006 15, 30, 45 und 60 Sekunden nach der Sprengung. Farblich dargestellt ist die Höhe der Staubwolke relativ zum Geländemodell. Reproduziert mit Bewilligung von swisstopo (BA071263).

### 6 Fazit

Die photogrammetrischen Auswertungen der im Vallée de la Sionne künstlich ausgelösten Lawinen sind für die Lawinenforschung eine wichtige Datenquelle. Es gibt keine andere Möglichkeit als die dynamische Photogrammetrie oder die Videogrammetrie, um die Dynamik sich schnell bewegender Objekte lagerichtig visuell darzustellen, zu quantifizieren und zu studieren. Aus diesem Grund müssen unsere Bestrebungen daraufhin zielen, die Prozessierungszeit so kurz wie möglich zu halten, um zu günstigen Konditionen so viel Information wie nur möglich gewinnen zu können. Der wichtigste Schritt in diese Richtung wäre die automatische Generierung des Oberflächenmodells der Lawine während möglichst vieler Zeitschnitte, nimmt doch die Digitalisierung der Oberfläche und der Frontlinien 70-80% der gesamten Produktionszeit in Anspruch.

Weiter gilt es, die Orientierung der Bilder zu verbessern und damit die Lagegenauigkeit zu erhöhen. Die Resultate der Ausgleichung aus dem Winter 2005/06 sind nach wie vor nicht ganz befriedigend. Obwohl zusätzliche gekantete Bilder in die Ausgleichung aufgenommen wurden, um die Selbstkalibrierung zu stabilisieren, konnten die Ausgleichungsresultate nicht signifikant verbessert werden. Ein zusätzlich aufgenommenes Bild vom Kamerastandpunkt BR zur Verlängerung der Basislinie brachte aufgrund der schlechten Bildqualität (Nebelschwaden) eine Vergrösserung der Kontrollpunkt-Residuen. Dieses Bild konnte darum in der Ausgleichung nicht berücksichtigt werden.

Eine weitere Verbesserung und Stabilisierung der Orientierung scheint vor allem mit der Verwendung von weniger verzeichnungsstarken Objektiven möglich. Aufgrund des schneearmen letzten Winters konnten diese Bestrebungen aber noch nicht in die Tat umgesetzt werden.

#### 7 Literaturverzeichnis

- <sup>1</sup> AMMAN, W. L., 1999: A new Swiss test-site for avalanche exeriments in the Vallée de la
- Sionne/Valais. Cold Regions Science and Technology, Volume 30, Issues 1-3: Pages 3-11. <sup>2</sup> LUHMANN, T., 2003: Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Oldenburg (D), Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg (D).
- <sup>3</sup> VALLET, J., 2002: Suivi d'aérosols par vidéogrammétrie: Etude de faisabilité. EPF Lausanne
- <sup>4</sup> VALLET, J. & TURNBULL, B. & JOLY, S. & DUFOUR, F., 2004: Observations on powder snow avalanches using videogrammetry. Cold Regions Science and Technology, Volume 39: Issues 2-3, Pages 153-159

## Ableitung photogrammetrischer Produkte mit der MFC-Kamera

#### ANKO BÖRNER<sup>1</sup>, HEIKO HIRSCHMÜLLER<sup>2</sup>, MICHAEL NEIDHARDT<sup>1</sup>, MICHAEL NITZ<sup>1</sup>, KARSTEN SCHEIBE<sup>1</sup>, JÜRGEN WOHLFEIL<sup>1</sup>, SERGEJ ZUEV<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Das Institut für Robotik und Mechatronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) hat in den letzten Jahren ein zeilenbasiertes Kamerasystem entwickelt, was sich durch eine hohe Modularität auszeichnet und für viele terrestrische und luftgestützte Applikationen einsetzbar ist. Dabei stehen photogrammetrische Aufgabenstellungen im Vordergrund. Der Beitrag gibt einen Überblick über die Multi Functional Camera (MFC). Kernstück sind Fokalebenenmodule, die aus der CCD-Zeile und der dazugehörigen Front-End-Elektronik bestehen. Bis zu fünf Module sind in einer MFC-Kamera integrierbar. Die Datenaufnahme wird mit einem Inertialmesssystem synchronisiert. Die Basisparameter des Systems werden vorgestellt und diskutiert. Die Datenverarbeitungskette ist darauf ausgelegt, mit möglichst wenig Interaktionen photogrammetrische Produkte (DTM, Orthophotos) abzuleiten. Dazu werden verschiedene, komplexe Prozessierungsstufen durchlaufen. Die Auswertung der Inertialdaten gewährleistet Positions- und Lagedaten in hinreichender Genauigkeit. Kameradaten werden automatisch von systematischen Störungen befreit. Informationen zum Boresight Alignment sowie Kalibrationsdaten werden bei der Berechnung der Level-3-Daten berücksichtigt, die die Zeilenscannerdaten auf eine Ebene projizieren. Anschließend werden mit Hilfe eines Semi-Globalen Matchers die korrespondierenden Punkte zugeordnet, aus denen dann hochgenau Oberflächenmodelle erstellt werden, die die Basis für die Generierung von Orthophotos sind. Die Leistungsfähigkeit des kompletten Ansatzes wird bewertet.

#### 1 Einleitung

Der Bedarf an digitalen Kamerasystemen, die für photogrammetrische Aufgaben eingesetzt werden können, steigt jährlich. Im Bereich der Luftbildphotogrammetrie haben diverse Systeme (z.B. HRSC, ADS40, DMC, UltraCam) in den letzten Jahren nachgewiesen, dass digitale Sensoren den hohen Ansprüchen der Vermessungsingenieure genügen. Die Entwicklungen in den verschiedenen technologischen Bereichen (Detektoren, Speichermedien, Prozessoren) haben sehr große Fortschritte gemacht. Hinzu kamen Entwicklungen in der Algorithmik und bei Softwareprodukten, die solche Systeme immer leistungsfähiger und zuverlässiger werden ließen. In der Einrichtung Optische Informationssysteme des DLR werden seit Jahren hochauflösende Kamerasysteme für photogrammetrische und fernerkundliche Aufgabenstellungen entwickelt, gebaut, kalibriert und betrieben. Beispiele für erfolgreiche Projektbeteiligungen sind ADS40, RapidEye und der Panoramakamera. Die Nutzung und Weiterentwicklung von Matching-Algorithmen aus der Robotik ermöglichte einen qualitativen Sprung bei der Erzeugung von

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Anko Börner: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Einrichtung Optische Informationssysteme am Institut für Robotik und Mechatronik, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin, email: anko.boerner@dlr.de

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Heiko Hirschmüller: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Robotik und Mechatronik, Münchner Str. 20, 82234 Wessling, email: heiko.hirschmueller@dlr.de

dreidimensionalen Oberflächenmodellen. Die Kombination dieser Kenntnisse gestattet es dem DLR, auf eine komplette Entwicklungskette zurückzugreifen, die bei der Konzipierung dedizierter Sensorsysteme beginnt und mit der Erzeugung hochwertiger Datenprodukte endet. Ein herausragendes Produkt dieser Systemfähigkeit ist die Kamera MFC (Multi Functional Camera).

## 2 Multi Functional Camera (MFC)

Die MFC ist eine Kamera, die auf CCD-Zeilen basiert. Jede Zeile ist auf einem separaten Fokalebenen-Modul aufgeklebt. Dieses Modul ist gleichzeitig der Träger der Heat Pipes zur Kühlung. Die Front-End-Elektronik befindet sich auf zwei Platinen, die direkt an die CCD gelötet und mechanisch durch das Fokalebenen-Modul aufgenommen werden, wodurch sich extrem kurze Wege für die analogen Signale ergeben. Die Front-End-Elektronik übernimmt die Wandlung des analogen in ein digitales Signal, die Korrektur von systematischen Fehlern (Dunkelstrom, Pixelungleichförmigkeit) und gegebenenfalls die Datenkompression. Die digitalen Daten werden über eine USB2.0-Schnittstelle auf einen handelsüblichen Rechner (z.B. Laptop, PC104-Stack oder 19"-Industrierechner) übertragen und dort, für jedes Fokalbenen-Modul separat, auf einer Festplatte gespeichert.



Abbildung 1: MFC-Fokalebene-Modul, Kamera

Die Besonderheiten dieses Ansatzes sind:

- Modularität (bis zu fünf Fokalebenen-Module mit einstellbarem Stereowinkel)
- Verwendung von Standard-RGB-CCD-Zeilen mit identischer Bauform und Pin-Belegung sowie einer Pixelanzahl von 6000....14400
- Nutzung des USB2.0-Interface zur Speicherung der Daten

Die Konfiguration der bei den Befliegungen genutzten MFC*Three* (drei Fokalebenen-Module) ist aus Tabelle 1 ersichtlich:

Brennweite	80mm
MTF @ 55lp/mm (Nyquistfrequenz)	55lp/mm
Anzahl der Fokalebenen-Module	3
Stereowinkel	±12°
Pixelanzahl	8000 RGB
Pixelgröße	9μm
Radiometrische Auflösung	12Bit
Zeilentakt	400Hz
Inertialmesssytem	IGI IMU IId oder Applanix POS AV-410
Masse	15kg
Abmaße	200mm x 340mm x 340mm

Tab. 1: Parameter der MFCThree

Die Fokalebenen-Module werden nacheinander in einen Fokalebenenrahmen montiert und zur Optik ausgerichtet, was den Justageaufwand erheblich reduziert.

## 3 Kalibration

Die radiometrische Kalibrierung der MFC beinhaltet eine Korrektur des elektronischen Offsets, eine Dunkelstromkorrektur (DSNU), eine Homogenisierung der unterschiedlichen Empfindlichkeit der Einzelpixel (PRNU) und einen Weißabgleich (SCHUSTER & BRAUNECKER, 2000). Die PRNU-Korrektur berücksichtigt den Randabfall des Objektivs. Hierfür wird die Kamera mit einem diffusen, homogenen Strahler (z.B. Ulbrichtkugel) vermessen. Die geometrische Kalibrierung der Kamera wird durch eine Einzelpixelvermessung mittels eines aufgeweiteten Kollimatorstrahls und eines Zwei-Achsen-Manipulators realisiert. Damit kann die innere Orientierung bzw. die Blickrichtung eines jeden Pixels der Zeile in einer idealen fiktiven Fokalebene bestimmt werden (SCHEIBE, 2006). Die Ergebnisse der geometrischen Kalibration sind hochgenau (0.1 Pixel) und konnten zu mehreren Zeitpunkten (vor und nach verschiedenen Messkampagnen) reproduziert werden.

## 4 Messkampagnen

Die MFC wurde hinsichtlich ihrer Bildqualität, geometrischen Auflösung und Genauigkeit in verschiedenen Messkampagnen getestet. Da die MFC*Three* hauptsächlich für die digitale Luftbildphotogrammetrie verwendet wird, wurden von Oktober 2006 bis März 2007 Messkampagnen in Berlin und Bayern durchgeführt. Für die Bewertung des Systems und zur Unterstützung von zukünftigen Flugkampagnen wurde auf dem Gelände des DLR ein Passpunktfeld von ca. 2km<sup>2</sup> vermessen sowie ein Siemensstern ausgelegt.

Außerdem wurden Tests durchgeführt, um einen Einsatz der MFC für terrestrische Applikationen vorzubereiten. Dazu wurde die Kamera in ein Fahrzeug und auf einen Drehtisch montiert.

## 5 Vorverarbeitung

#### 5.1 IGI/ Applanix

Für eine direkte Georeferenzierung der MFC-Bilder wird eine exakte Bestimmung aller sechs Parameter der äußeren Orientierung benötigt. Eine typische technische Lösung für eine direkte Messung der Kamera-Orientierung ist die mittlerweile übliche Verwendung eines integrierten GPS/Inertial Systems (IMU). Das MFC-Kamerasystem ist für den Einsatz von einem (für den operationellen Flugbetrieb) oder zwei (für Testflugbetrieb) in der Luftbildphotogrammetrie gängigen GPS/INS Systemen (z.B. IGI AEROControl IId, Applanix POS-AV 510) konzipiert. Die IMUs werden dabei direkt am MFC-Gehäuse befestigt. Beide Systeme haben gleiche Spezifikationen für die im Post-Processing erzielbaren Genauigkeit (Position: 5-10 cm RMS Fehler, Lage: 0.005° für Roll- und Pitch-Winkel und von 0.008° für Heading). Beim MFC-Kalibrationsflug in Berlin am 28.3.2007 wurden beide Systeme gleichzeitig mit der MFC betrieben, in diesem Artikel wird jedoch nur die Genauigkeit des IGI AEROcontrol IId System analysiert. Die Zeitsynchronisation zwischen der MFC und dem IGI-System wurde zu Validierungszwecken mit zwei verschiedenen Verfahren durchgeführt. Zum einen über ein PPS-Signal (pulse per second) vom IGI-System zur Kamera und zum anderen über einen Event-Signal von der Kamera zum IGI-System. Die Abstände zwischen GPS-Antenne, IMU und MFC wurde mit cm-Genauigkeit vermessen. Das Post-Processing der aufgezeichneten IGI-Navigationsdaten besteht aus zwei Phasen. Die erste Phase beinhaltet eine reine GPS-Prozessierung, wobei die GPS-Daten vom Flugzeug zusammen mit den Daten der SAPOS-Referenzstation zu einer kinematischen GPS-Trajektorie prozessiert werden (s/w Waypoint GrafNav 7.50). Diese resultierende GPS-Lösung mit einer Taktrate von 0.5Hz beschreibt die Position (Latitude, Longitude, Altitude) und den Geschwindigkeitsvektor im WGS84-Koordinatensystem mit absoluter Genauigkeit von 5-10cm für die Position und einigen cm/s für die Geschwindigkeit. Die zweite Phase besteht aus der GPS/INS-Integration (s/w AEROoffice 5.0d). Der auf IMU-Daten basierende Inertial-Navigationsalgorithmus wird dabei durch die zusätzliche GPS-Positions- und Geschwindigkeitsinformation gestützt. Die resultierende Navigationslösung mit einer Rate von 256Hz beschreibt die Parameter der äußeren Orientierung der MFC-Kamera mit der oben beschriebenen Post-Processing-Genauigkeit.

#### 5.2 Boresight-Alignment

Die relative Lage des Kamera- und IMU-Koordinatensystems zueinander muss bei der Ermittlung der Parameter der äußeren Orientierung der Kamera durch eine zusätzliche Rotation ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) zu den von der IMU gemessenen Rotationen (roll, pitch, yaw) berücksichtigt werden. Für die Dauer einer Messkampagne bleiben die Boresight-Winkel konstant. Die Bestimmung des Boresight-Alignments kann mit und ohne Passpunkte durchgeführt werden. Bei der Verwendung von Passpunkten genügen die Bildpunkt/Objektpunkt-Paare eines Bildstreifens zur Bestimmung der Boresight-Winkel. Dafür werden die Kolinearitätsgleichungen durch eine Taylorentwicklung der 1. Ordnung linearisiert und die Unbekannten mit einem Newtonverfahren bestimmt. Bei einer Überbestimmung des Gleichungssystems werden die Parameter mit der Gauß-Methode der kleinsten Fehlerquadrate ausgeglichen. Für die Verwendung von mehreren Flugstreifen werden die Parameter mittels Bündelblock ausgeglichen. Die Bestimmung des Boresight-Alignments ist

auch möglich, wenn vermessene Passpunkte fehlen. Dabei werden Objektpunkten identifiziert, die in zwei oder mehr Aufnahmen sichtbar sind. Anhand der Bildkoordinaten dieser Objektpunkte können die Positionen der Objektpunkte durch Bildung des Mittelwerts der aus je zwei Bildpunkten rekonstruierten 3D-Punkte (Vorwärtsschnitt) geschätzt werden. Als Maß für die Genauigkeit der Schätzung wird die Standardabweichung der 3D-Punkte verwendet. Mithilfe der Methode des steilsten Abstiegs wird nach jener Rotation  $R_M^{\mathcal{L}}$  ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) gesucht, welche die Standardabweichungen aller Objektpunkte minimiert.

#### 5.3 Bestimmung der Rekonstruktionsgenauigkeiten

Die geometrische Genauigkeit der MFC hängt im Wesentlichen von drei Faktoren ab: der Genauigkeit der Laborkalibrierung (Innere Orientierung), der Genauigkeit der Positions- und Lagemessung durch eine IMU (Äußere Orientierung), sowie der korrekten Bestimmung des Boresight-Alignments. Bei einem Testflug über das WISTA-Gelände in Berlin-Adlershof, wurden 30 exakt vermessene Passpunkte zur Verifikation der geometrischen Genauigkeit verwendet.

Passpunkt-Koordinaten	verwendet	nicht verwendet	
	0.0189°	0.0189°	
$R^{C}_{\mu}$	-0.1040°	-0.1041°	
M	-0.1215°	-0.1114°	
SIG <sub>XY</sub>	8 cm	8 cm	
SIG <sub>3D</sub>	52 cm	50 cm	
<i>RMS</i> <sub>xy</sub>	14 cm	15 cm	
<i>RMS</i> <sub>3D</sub>	59 cm	60 cm	

Tab. 2: Genauigkeiten bei der Stereorekonstruktion von Objektpunkten mit der MFC Three

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Auswertung dargestellt. Spalte 1 zeigt die unter Verwendung der Passpunktkoordinaten ermittelten Winkel des Boresight-Alignments für drei sich überlappende Flugtrassen. Die mittlere Abweichung in horizontaler Richtung ( $RMS_{XY}$ ) ist bei der Bodenauflösung von 15 cm/Pixel hinreichend gering, zumal sie zusätzlich die Fehler bei der manuellen Markierung der Passpunkte in den Bilddaten enthält. Die weitaus größere räumliche Abweichung ( $RMS_{3D}$ ) ist durch die relativ kleinen Stereo-Winkel der MFC*Three* von  $\pm 12^{\circ}$  begründet. In Spalte 2 werden die Ergebnisse der Bestimmung des Boresight-Alignments ohne die Verwendung der Passpunktkoordinaten gezeigt. Die Standardabweichung ( $SIG_{3D}$ ) der geschätzten Passpunktkoordinaten wurde mit den dargestellten Winkeln auf 50cm minimiert. Das ermittelte Alignment und das nachträglich berechnete RMS zeigen, dass auch ohne bekannte Passpunktkoordinaten vergleichbare Ergebnisse erzielt werden können, wie mit bekannten. Somit kann auf das aufwendige Vermessen von Passpunkten weitestgehend verzichtet werden.

#### 5.4 Datenformate

Als letzter Schritt der Vorverarbeitung kann nun für jede Bildzeile ein zeitlich exakt synchronisierter und von Alignment-Fehlern befreiter Datensatz zur äußeren Orientierung der

Kamera erzeugt werden. Zusammen mit den Kalibrationsdaten sind somit die Vorraussetzung für eine photogrammetrische Weiterverarbeitung gegeben.

#### 6 Photogrammetrische Verarbeitung

#### 6.1 Vorverarbeitung

Zur Vorbereitung des Matchings sind die Bilddaten der Zeilenkamera mittels Kolinearitätsgleichung auf eine Referenzebene zu projizieren. Diese Ebene orientiert sich an einem lokalen kartesischen Koordinatensystem, das durch einen Aufpunkt am WGS84-Ellipsoid fixiert ist. In diesem Koordinatensystem werden alle Datenprodukte bereitgestellt und abschließend wiederum in ein WGS94-Format überführt.

#### 6.2 Matching

Die geometrisch korrigierten Bilder dienen als Eingangsdaten für die nächsten Verarbeitungsschritte. Um den Suchraum für das Stereomatching optimal einzuschränken, werden korrespondierende Punkte nur entlang epipolarer Linien gesucht, die sich aus der inneren und äußeren Kamerageometrie ergeben. Die epipolaren Linien sind bei Zeilenkamerabildern im allgemeinen keine Geraden, was zum einen auf die Mischung aus Parallelprojektion in Flugrichtung und perspektivischer Projektion quer zur Flugrichtung zurückzuführen ist, aber auch durch die allgemeine Flugbewegung verursacht wird. Insbesondere die Seitwärtsbewegung des Flugzeugs durch Wind führt zu schlangenlinienartigen epipolaren Linien. Die epipolaren Linien werden Punktweise durch Rekonstruktion jedes Pixels in verschiedenen Abständen und Projektion in die jeweils anderen Zeilenkamerabilder berechnet (HIRSCHMÜLLER et al. 2005). Um eine für das Stereomatching ausreichende Genauigkeit der epipolaren Linien von 0.5-1 Pixel sicherzustellen, muss die innere und äußere Kamerageometrie mit eben dieser Genauigkeit bekannt sein (Kapitel 5). Die Stereoverarbeitung wird mit dem Semi-Global Matching (SGM) Verfahren durchgeführt (HIRSCHMÜLLER, 2005). Dieses Verfahren basiert auf der Minimierung einer globalen Kostenfunktion.

$$E(D) = \sum_{p} \left( C(p, D_p) + \sum_{q \in N_p} P_1 T[D_p - D_q] = 1 \right] + \sum_{q \in N_p} P_2 T[D_p - D_q] > 1 \right)$$
eq. 1

Der erste Term der Funktion addiert die Kosten für ein pixelweises Matching  $C(p, D_p)$  über alle Pixel *p* des Bildes. Der zweite Term addiert einen konstanten Wert *P*<sub>1</sub>, falls benachbarte Pixel einen geringfügig anderen Disparitätswert (um 1 verschieden) zugeordnet bekommen. Die Funktion *T*[] ist 1, wenn die Bedienung erfüllt ist und sonst 0. Der dritte Term addiert einen im Vergleich zu *P*<sub>1</sub> größeren Wert *P*<sub>2</sub>, falls benachbarte Pixel einen größeren Disparitätsunterschied aufweisen. Der erste Term wird auch als Datenterm und der zweite und dritte Term als Glättungsterm bezeichnet, da über ihn eine stückweise Glattheit der Disparitätsfunktion erzwungen und damit das pixelweise Matching erst sinnvoll wird. Zu beachten ist, dass über den Glättungsterm alle Pixel des Bildes miteinander verknüpft sind. Für jedes mögliche Disparitätsbild *D* ergibt die Funktion einen bestimmten Kostenwert *E*(*D*). Ziel ist es, das Disparitätsbild zu finden, welches den kleinsten Kostenwert ergibt. Leider ist diese Minimierung

ein *NP* Problem für die Klasse der kantenerhaltenden Kostenfunktionen (wie der obigen) mit zweidimensionaler Verknüpfung des Glättungsterms (BOYKOV et al., 2001). Für eindimensionale Verknüpfungen (z.B. für jede Bildzeile getrennt) kann die Funktion jedoch sehr effizient mittels Dynamic Programming (*DP*) mit einer Komplexität von  $O(N \times D)$  minimiert werden, wobei *N* die Anzahl der Pixel und *D* der Disparitätsbereich ist. Bei SGM wird die Funktion nicht nur entlang der Bildzeilen, sondern auch entlang der Spalten und diagonal hierzu durchgeführt was die Stabilität erhöht. Ein anschließender Konsistenzcheck und ein Peakfilter eliminieren Ausreißer. Sub-Pixel Genauigkeit wird mittels quadratischer Interpolation erreicht. Das SGM Verfahren arbeitet auf Bildpaaren. Stehen mehr als zwei Bilder zur Verfügung, wird paarweise gematched und dann Pixelweise der Median der Disparitätswerte ermittelt.



Abbildung 2: MFC-Datenprodukte, Testflug vom 22.3.2007 über Berlin Adlershof, links texturierte, rechts untexturierte Oberflächenmodelle, das DLR-Gebäude und Bessy sind erkennbar

Um radiometrische Unterschiede der Bilder während des Matchings zu kompensieren, werden die pixelweisen Matchingkosten  $C(p, D_p)$  durch Mutual Information berechnet (HIRSCHMÜLLER, 2005; VIOLA & WELLS, 1997). Da Luftbilder, insbesondere von Zeilenkameras, sehr groß sind, werden diese für die Stereoverarbeitung in überlappende Kacheln unterteilt und die Disparitätsbilder mittels Überblenden fusioniert (HIRSCHMÜLLER, 2005). Die Erstellung der Oberflächenmodelle geschieht durch Rekonstruktion aus den Disparitätsdaten und anschließender Projektion in ein geeignetes Koordinatensystem. Anschließend werden die Bilddaten auf der Basis der erstellten Oberflächenmodelle umprojiziert, um Orthobilder zu generieren (HIRSCHMÜLLER et al., 2005). Abbildung 2 zeigt kleine Ausschnitte aus untexturierten und texturierten Oberflächenmodellen, die mit dem beschriebenen Verfahren in einer Auflösung von 15 cm/Pixel erzeugt wurden. Es ist klar zu erkennen, dass Gebäudekanten sehr scharf und exakt abgebildet werden und auch im Oberflächenmodell viele Details erhalten bleiben.

## 7 Ausblick

Das Institut für Robotik und Mechatronik des DLR hat mit der MFC ein sehr leistungsfähiges Kamerasystem entwickelt. Durch den modularen und skalierbaren Aufbau, die Nutzung standardisierter Schnittstellen und durch die Verwendung von Off-the-Shelf-Komponenten entstand ein sehr robustes und preiswertes Sensorsystem, das für eine Vielzahl von photogrammetrischen Applikationen einsetzbar ist. Mit dem Semi-Global-Matching-Verfahren steht ein Bildzuordnungsalgorithmus zur Verfügung, mit dessen Hilfe sehr detailtreue Oberflächenmodelle mit hoher Auflösung und Genauigkeit gewonnen werden können. Die jahrzehntelange Expertise des DLR auf den Gebieten der Kameraentwicklung, der Photogrammetrie und der Kalibration gestatten es, die gesamte Entwicklungskette von der Systementwicklung bis zum Datenprodukt abzubilden. Zukünftige Aktivitäten werden sich auf die Erhöhung des Automatisierungsgrades, die Echtzeitverarbeitung und die Fusion mit Daten anderer Systeme (terrestrische, luft- oder satellitengestützte Laserscanner und Kameras) konzentrieren.

## 8 Literaturverzeichnis

- BOYKOV, Y., VEKSLER, O. & ZABIH, R., (2001), Efficient Approximate Energy Minimization via Graph Cuts, IEEE Transactions on Patterns Analysis and Machine Intelligence, Volume 23(11), pp. 1222-1239.
- HIRSCHMÜLLER, H., (2005), Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information, in Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 20-26 June 2005, San Diego, CA, USA, Volume 2, pp. 807-814.
- HIRSCHMÜLLER, H., SCHOLTEN, S. & HIRZINGER, G. (2005), Stereo Vision Based Reconstruction of Huge Urban Areas from an Airborne Pushbroom Camera (HRSC), in Lecture Notes in Computer Science: Pattern Recognition, Proceedings of the 27th DAGM Symposium, 30 August - 2 September 2005, Vienna, Austria, Volume 3663, pp. 58-66.
- VIOLA, P. & WELLS, W. M. (1997), Alignment by Maximization of Mutual Information, International Journal of Computer Vision, Volume 24(2), pp. 137-154.Brummitt, N. & Lughadha, E. N., 2003: Biodiversity: Where's Hot and Where's Not. Conservation Biology, **17** (5): 1442-1448.
- SCHUSTER, R. & BRAUNECKER, B., (2000), Calibration of the LH Systems ADS40 Airborne Digital Sensor, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, Part B1, Amsterdam 2000, S. 288-294, 2000
- SCHEIBE, K. (2006), Design and Test of Algorithms for the Evaluation of Modern Sensors in Close-Range Photogrammetry, Dissertation, Universität Göttingen

# Photogrammetrische Anwendungen in der Planetenforschung

#### FRANK SCHOLTEN, MARITA WÄHLISCH, BERND GIESE, KLAUS GWINNER, THOMAS ROATSCH, KLAUS-DIETER MATZ, ANGELIKA HOFFMEISTER, JÜRGEN OBERST & RALF JAUMANN<sup>1</sup>

Zusammenfassung: Schwerpunkte der photogrammetrischen Verarbeitung von planetaren Fernerkundungsdaten am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in Berlin-Adlershof sind, soweit durch die Aufnahmegeometrie gegeben, die Stereo-Auswertung zur Ableitung der Topographie der abgebildeten Oberflächen, die lagegenaue Orthorektifizierung der Bilddaten der vorhandenen Spektralkanäle sowie die Darstellung der Ergebnisse in kartographischer Form. Je nach Datenbestand erfolgen diese Arbeiten lokal, regional oder global. Daneben werden im Rahmen der Auswertungen auch andere wissenschaftliche Ziele im Bereich der Geodäsie und Geophysik verfolgt (Definition der Planetenachsen, Bestimmung von Rotationsparametern, Aufbau und Verdichtung von astrometrische Bahnbestimmung, Kontrollpunktnetzen, Erfassung von Atmosphärenphänomenen, etc.).

## 1 Einleitung

Bilddaten sind die wichtigste Grundlage für verschiedenartige wissenschaftliche Untersuchungen im Bereich der Planetenforschung. Zahlreiche Missionen zum Erdmond, den erdähnlichen Planeten (Merkur, Venus, Mars), den großen Gasplaneten (Jupiter, Saturn), den Planetenmonden sowie zu Asteroiden haben hierzu in den vergangenen Jahrzehnten umfangreiches Bildmaterial geliefert. Das Institut für Planetenforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) in Berlin-Adlershof ist neben früheren Projektbeteiligungen in aktuelle Missionen, wie *CASSINI, MARS EXPRESS, VENUS EXPRESS,* involviert. Neben Entwicklung, Bau und Betrieb der Sensorsysteme stehen die Planung der Aufnahmesequenzen sowie insbesondere die wissenschaftliche Datenauswertung im Vordergrund. Grundlage für photogrammetrische und andere geowissenschaftliche Arbeiten bilden die zur Erde übermittelten und im Rahmen der systematischen Prozessierung aufbereiteten Rohdaten, die innerhalb der Missionsteams auch an andere Institute im In- und Ausland weitergegeben werden.

Photogrammetrische Verfahren spielen in der Verarbeitung der planetaren Bilddaten eine besondere Rolle. Die hierfür relevanten Rahmenbedingungen sind dabei durchaus unterschiedlich. So variiert die Kenntnis über die innere Orientierung der verwendeten Aufnahmesysteme, wie auch das a-priori Wissen zur äußeren Orientierung (Bahn-/Lageinformation) oder über die geophysikalischen Parameter der beobachteten Körper. Demzufolge müssen auch die zur Anwendung

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Dipl.-Ing. Frank Scholten, Dipl.-Phys. Marita Wählisch, Dr. Bernd Giese, Dipl.-Geol. M.A. Klaus Gwinner, Dr. Thomas Roatsch, Dipl.-Math. Klaus-Dieter Matz, Angelika Hoffmeister, Dr. Jürgen Oberst, Prof. Dr. Ralf Jaumann, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Planetenforschung, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin, e-mail: Frank.Scholten@dlr.de

kommenden photogrammetrischen Auswerteverfahren den jeweiligen Bedingungen angepasst werden. Auch die im Einsatz befindlichen Aufnahmesysteme, von Framekameras über Ein- und Mehrzeilen-Scanner bis hin zu abbildenden Spektrometern mit mehr als 350 Kanälen, erfordern flexible Verarbeitungsmethoden.

Im Folgenden wird anhand von Beispielen ein Überblick über bisherige Arbeiten an unserem Institut sowie über Entwicklungen und Ergebnisse zu aktuellen Missionen im Bereich der planetaren Photogrammetrie, Kartographie und Geodäsie gegeben.

#### 2 Der Mond - großflächige Bildmosaike und lokale Oberflächenmodelle

Unser nächster Nachbar, der Mond, wurde seit 1959 im Rahmen verschiedener sowjetischer und US-amerikanischer Missionen auch mit Kamerasystemen erkundet. Die erste und bisher einzige systematische fernerkundliche Erfassung der Mondoberfläche erfolgte mit der *CLEMENTINE*-Mission im Jahre 1994. Im Verlauf einer 3-monatigen Aufnahmephase wurde aus einem exzentrischen, polaren Orbit heraus (nächste Annäherung ca. 400 km) erstmals eine vollständige Abdeckung erzielt (mittlere Auflösung 200 m/pxl). Daten der dabei eingesetzten 4 Kamerasysteme sind Tab. 1 zu entnehmen.

Kamera	Тур	Detektor	Brennweite	Bodenaufl.	Spektral-	Wellenlängen-
				@ 400 km	kanäle	bereich
HIRES	Frame	CCD	1250 mm	7 m	5	400 - 800 nm
		384 x 288				
UVVIS	Frame	CCD	90 mm	102 m	5	415 - 1000 nm
		384 x 288			+ Breitband	
NIR	Frame	CCD	96 mm	158 m	6	1,1 - 2,78 μm
		256 x 256				
LWIR	Frame	CCD	350 mm	57 m	1	8,0 - 9,5 μm
		128 y 128				

Tabelle 1: Die Kameras der CLEMENTINE-Mission

In der ersten Phase der Aufnahmeperiode wurden durchweg Nadiraufnahmen erstellt, die zur globalen Abdeckung dienten. Dabei konnte am DLR (OBERST et al., 1999) neben anderen Mosaiken mit den Daten der HIRES-Kamera u.a. auch erstmalig ein hoch aufgelöstes Bildmosaik (20 m/pxl) der Südpolregion (Abb. 1, WÄHLISCH et al., 1999) erstellt werden, in der in einigen Kratern größere Wassereisvorkommen vermutet werden. In der zweiten Phase wurde durch Schwenken der Sonde in Flugrichtung eine Stereo-Überdeckung erzeugt, die zur Simulation von HRSC-Aufnahmen der damals geplanten Mars-Mission diente. Aus anderen, eher seltenen Aufnahmen, bei denen die Sonde quer zur Flugrichtung geneigt und somit seitliche Überlappung erzeugt wurde, ist am DLR z.B. für einen Teil der *Mare Orientale*-Region (Abb. 1) ein Digitales Oberflächenmodell mit einer Rasterweite von 400 m abgeleitet worden, welches die Genauigkeit eines auch auf der *CLEMENTINE*-Mission betriebenen LIDAR-Systems weit übertraf

(WÄHLISCH et al., 1996). Alle Höhenmodelle basieren auf Bahn- und Lagedaten, die mit Methoden des Bündelblockausgleichs verbessert wurden





Abbildung 1: Ergebnisse der CLEMENTINE-Mission: Mare Orientale 200 m UVVIS-Mosaik (oben), ca. 1500 Einzelbilder; Mare Orientale Teilregion (links) als Mosaik, Anaglyphenbild und DGM aus 23 Stereobildpaaren; Südpolregion 20 m HIRES-Mosaik (unten), ca. 3000 Einzelbilder



#### 3 Die Galileischen Monde des Jupiter - lokale und regionale Oberflächenmodelle

Das Jupitersystem wurde erstmalig durch die Mission *GALILEO* systematisch erkundet. Nachdem in den 1970er Jahren die Sonden der *PIONEER-* und *VOYAGER-*Missionen während ihrer Vorbeiflüge aus mehreren Hunderttausend Kilometern nur vereinzelte Aufnahmen machen konnten, waren neben dem Jupiter selbst insbesondere die sog. Galileischen Monde, Io, Europa, Ganymed und Callisto das Ziel der *GALILEO*-Mission, die nach zwei Vorbeiflügen am Erdmond das Jupitersystem im Dezember 1995 erreichte.

Die im Rahmen verschiedener naher Vorbeiflüge aufgezeichneten Daten der SSI-Kamera (CCD 800 x 800 pxl, 1500 mm Brennweite, Bodenauflösung z.T. besser als 100 m/pxl) konnten am DLR erstmals zur Ableitung von Digitalen Oberflächenmodellen genutzt werden. Die photogrammetrische Verarbeitung umfasste die Optimierung der Bahn- und Lagedaten im Rahmen eines Bündelblockausgleichs, die digitale Bildzuordnung von Daten verschiedener Vorbeiflüge sowie die abschließende DGM-Interpolation. Abb. 2 zeigt das Bespiel eines Digitalen Oberflächenmodells des Jupitermonds Ganymed im Bereich der sog. "Galileo Region", das aus 2 Vorbeiflügen, G1 und G2, im Abstand von 3 Monaten (G1 vier Aufnahmen, G2 eine Aufnahme) erstellt werden konnte (GIESE et al, 1998). Die Daten des G1-Vorbeifluges weisen am rechten Rand Lücken auf, die durch fehlerhafte Onboard-Datenverarbeitung (Datenverlust durch fehlerhaft prognostizierte Kompression) entstanden sind - ein Beispiel für die Widrigkeiten, wie sie im Rahmen von Raumfahrtprojekten auftreten können.



Abbildung 2: GALILEO-SSI-Stereoverarbeitung, Jupitermond Ganymed (Galileo Region, ca. 60 x 100 km) links: 5 SSI-Bilder aus 2 Vorbeiflügen (ca. 100 m/pxl), rechts: DGM, 1 km Raster

### 4 Die Saturnmonde - Topographie, globale Atlanten und Spektrometermosaike

Das Saturnsystem umfasst, soweit bisher bekannt, mehr als 50 Monde, von denen die Eismonde mittlerer Größe (Phoebe, Iapetus, Enceladus, Mimas, Tethys, Dione, Rhea, Hyperion) sowie der größte Saturn-Mond Titan seit 2004 im Rahmen der CASSINI-Mission näher erkundet werden.

Zuvor gab es, ähnlich dem Jupitersystem, lediglich Vorbeiflüge der PIONEER- und VOYAGER-Sonden. Die *CASSINI*-Sonde besitzt zwei 1k x 1k Frame-Kameras, eine Schmalwinkelkamera mit 2000 mm Brennweite (ISS-NAC) sowie eine 200 mm Weitwinkelkamera (ISS-WAC).



Abbildung 3: CASSINI-ISS-Stereoverarbeitung am Saturnmond Phoebe links: DGM (ca. 1-2 km/pxl), rechts: Orthobildmosaik, ca. 100 m/pxl

Am DLR wurden in den vergangenen Jahren Altlanten der einzelnen Monde in Maßstäben von 1:500.000 bis 1:1.000.000 aus den panchromatischen *VOYAGER*- und *CASSINI*-Daten erstellt (ROATSCH et al., 2006). Bei diesen Arbeiten stellen verschieden Faktoren eine besondere Herausforderung dar, u.a. die sehr unterschiedlichen Beleuchtungsverhältnisse und Auflösungen in den Bilddaten sowie die z.T. unzureichenden nominellen Orientierungsdaten, die im Falle von Limb-Aufnahmen (Planeten-/Mondrand) einer besonderen Optimierung unterzogen werden.



Abbildung 4: CASSINI-VIMS, Saturnmond Titan, Bildmosaik, (VIMS-Kanal 166, 2µm),

Auflösung von bis zu 2 km/Pxl

Neben der Erstellung der Bildkarten konnten einige der aufgezeichneten *CASSINI*-ISS-Daten auch für eine stereo-photogrammetrische Auswertung herangezogen werden. Abb. 3 zeigt ein Bespiel des Saturnmondes Phoebe, für dessen eine Hemisphäre aus 8 Stereo-Bildpaaren Information über deren Topographie abgeleitet werden konnte (GIESE et al., 2006). Zuvor waren wiederum die Bahn-/Lagedaten mit Hilfe eines Bündelblockausgleichs zu verbessern. Dabei musste im Rahmen der Auswertung die Rektaszension und Deklination der Rotationsachse von Phoebe neu bestimmt werden. Unter Einbeziehung des DGM wurden abschließsend 5 Orthobilder berechnet und zu einem Orthobildmosaik zusammengeführt. An Bord von CASSINI befindet sich auch ein abbildendes Spektrometer (VIMS) mit 352 Spektralkanälen (350 nm - 5,2  $\mu$ m). Diese Daten wurden am DLR für die Erstellung und Interpretation von multspektralen Bildmosaiken der Saturnmonde verwendet (JAUMANN et. al., 2006). Aufgrund der speziellen Aufnahmegeometrie, bei der jedes Bildelement jedes Kanals eine andere äußere Orientierung aufweist, war für deren Verarbeitung die Entwicklung besonderer Verfahren notwendig. Abb. 4 zeigt ein Mosaik aus Daten verschiedener Orbits.Die für das CASSINI-Spektrometer VIMS entwickelten Software-Komponenten zur Geo-Referenzierung wurden an die ROSETTA Spektrometerdaten des VIRTIS-Instrumentes angepasst, so dass diese Daten ebenfalls verarbeitet werden können.

#### 5 Die Venus - Erkundung der Atmosphäre

Die Venus ist derzeit Ziel der europäischen Mission *VENUS EXPRESS* (ESA, 2007). Neben anderen Instrumenten erfasst die in Deutschland entwickelte Kamera VMC die Venusatmosphäre in 4 verschiedenen Spektralkanälen (350 nm - 1,03 µm).

Die bildbasiert Auswertung der VMC-Daten konzentriert sich dabei auf den UV-Kanal, da in diesem Wellenlängenbereich die Wolken und deren Bewegungen in der oberen Schicht der sehr dichten Venusatmosphäre am besten zu erfassen sind. Das DLR erstellt für die weitere wissenschaftliche Auswertung turnusmäßig Bildmosaike aus den Einzelbildern der täglichen Orbits (z.B. Abb. 5). Darüber hinaus wurden spezielle Aufnahmesequenzen geplant, mit deren Hilfe durch gezielte Stereobeobachtungen, Schichtungen der Wolkenstrukturen erfasst und analysiert werden sollen.



Abbildung 5: VENUS EXPRESS Orbit 261, Venus-Atmosphäre VMC-Bildmosaik (UV-Kanal 350 - 385 nm), 23 Einzelbilder

#### 6 Der Mars - Gegenstand systematischer stereophotogrammetrischer Kartierungen

Die europäische Mission *MARS EXPRESS* ist die erste Planetenmission, die mit der High Resolution Stereo Camera (HRSC) und ihren Produkten die systematische bildhafte und dreidimensionale Erfassung eines Planeten zum Ziel hat (JAUMANN et al., 2007). Zuvor war der Mars bis in die Gegenwart Ziel zahlreicher Missionen, in denen ebenfalls Bilddaten, z.T. auch in hoher Auflösung, gewonnen wurden. Neben der aktuellen US-amerikanischen Mission *MARS RECONNAISSANCE ORBITER* sind die Kameradaten der beiden *VIKING*-Orbiter der 1970er Jahre von

Bedeutung. Sie lieferten eine große Anzahl von Bildern, deren radiometrische Auflösung z.T. gering war, die aber durch ihre globale Abdeckung für die photogrammetrische Bestimmung eines Mars-weiten Kontrollpunktnetzes verwendet wurden (ZEITLER & OBERST, 1999).



Abbildung 6: MARS EXPRESS, Orbit 2039, HRSC-DGM 50 m Raster u. MOLA-DGM 463 m Raster

Die HRSC, ein Mehrzeilen-Pushbroom-Scanner, Zusammenarbeit wurde vom DLR in mit Industriepartnern entwickelt und zeichnet seit 2004 Daten mit neun Zeilen (5 Stereozeilen, 4 Farbzeilen) in einer Auflösung von bis zu 10 m/pxl auf. Das Mehrzeilen-Stereoprinzip erlaubt es, innerhalb einer Aufnahmesequenz mit Methoden der digitalen Bild-Oberflächenmodelle und zuordnung darauf basierende farbige Orthobilder in hoher Auflösung zu generieren. Zunächst erfolgte die systematische Erstellung derartiger Produkte auf der Basis nomineller Bahn-/Lagedaten für jeden Orbit unmittelbar nach Empfang der Daten. Somit stehen erste Oberflächenmodelle meist bereits innerhalb eines Tages zur Verfügung (SCHOLTEN et al., 2005. Auf der Grundlage neuerer Entwicklungen können mittlerweile hoch auflösende Oberflächenmodelle und Orthobilder auf der Basis verbesserter Orientierungsdaten erstellt werden. Dabei dient die bislang beste globale Beschreibung der Marstopographie, ein 463 m Raster-DGM des US-amerikanischen Mars Orbiter Laser Altimeters (MOLA) der Mission MARS GLOBAL SURVEYOR als globale Referenz. HRSC-Oberflächenmodelle mit bis zu 50 m

Rasterweite (GWINNER et al., 2005, 2007) werden nun systematisch generiert und erweitern somit die bisherige Kenntnis über Details der Mars-Topographie (siehe Abb. 6). Die Ergebnisse der Arbeiten fließen u.a. in die Erstellung topographischer Karten ein (GEHRKE et al, 2006). Neben dem Mars wird auch einer der beiden Monde (Phobos) im Rahmen dedizierter HRSC-Auswertungen in hoher Auflösung untersucht (GIESE et al., 2005). Dabei konnten auch Abweichungen von der bisher angenommenen Umlaufbahn von Phobos festgestellt werden (OBERST et al., 2006).

#### 7 Zusammenfassung und Ausblick

Das DLR-Institut für Planetenforschung entwickelt und nutzt photogrammetrische Verfahren zur Erstellung von Digitalen Geländemodellen, Bildmosaiken und Karten zur lokalen, regionalen und globalen Beschreibung von Planeten- und Mondoberflächen. Neben *MARS EXPRESS* und *CASSINI* werden im Fokus künftiger Arbeiten insbesondere die *ROSETTA*-Mission mit den Vorbeiflügen an den Asteroiden Steins und Lutetia und zum Kometen Churyumov-Gerasimenko (Ankunft 2014) sowie die *DAWN*-Mission (Start Juni 2007) zu den Asteroiden Ceres und Vesta (Ankunft 2011) stehen. Bei beiden Missionen werden Erfahrungen bisheriger Arbeiten zur

Oberflächenmodellierung aus Stereo-Bilddaten genutzt werden. Weitere wichtige Beteiligungen bestehen bei den Merkur-Missionen *BEPICOLOMBO* (Start 2012) und *MESSENGER* (erster Merkur-Vorbeiflug Januar 2008), in deren Rahmen sowohl abbildende Systeme als auch Laser-Altimeter eingesetzt werden. Nicht zuletzt stehen unserem Erdmond eine Vielzahl von Besuchen bevor, wobei es DLR-Beteiligungen an der japanischen *SELENE*-Mission (Start August 2007) wie auch an einer geplanten deutschen Mondmission (möglicher Start 2013) gibt.

#### 8 Literaturverzeichnis

ESA, 2007:http://www.esa.int/SPECIALS/Venus\_Express/index.html.

- GEHRKE, S. et al., 2006: Neue Topographische Karten der Mars-Oberfläche. Publikationen der DGPF, 15, 83-92.
- GIESE, B. et al., 1998: The local topography of Uruk Sulcus and Galileo Regio obtained from stereo images. Icarus, 135, 303-316.
- GIESE, B. et al., 2005: Ein. Hoch auflösendes digitales Oberflächenmodell des Marsmondes Phobos. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, 5, 435-440.
- GIESE, B. et al., 2006: Topographic modeling of Phoebe using Cassini images. Planetary and Space Science, 54, 1156-1166.
- GWINNER, K. et al., 2005: Hochauflösende Digitale Geländemodelle auf der Grundlage von Mars Express HRSC-Daten. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, 5, 387-394.
- GWINNER, K. et al., 2007: Global mapping of Mars by systematic derivation of Mars Express HRSC high-resolution digital elevation models and orthoimages. ISPRS WG IV/7 Extraterrestrial Mapping Workshop, Houston, Texas.
- JAUMANN, R. et al., 2006: High-resolution CASSINI-VIMS mosaics of Titan and the icy Saturnian satellites. Planetary and Space Science, 54, 1146-1155.
- JAUMANN, R. et al., 2007: The high resolution stereo camera (HRSC) experiment on Mars Express: Instrument aspects and experiment conduct from interplanetary cruise through the nominal mission. Planetary and Space Science, (in Druck).
- OBERST, J. et al., 1999: Von den Apollo-Landungen bis heute. Sterne und Weltraum, 8,.648-656
- OBERST, J. et al., 2006: Astrometric observations of Phobos and Deimos with the SRC on Mars Express. Astronomy & Astrophysics, 447, 1145-1151.
- ROATSCH, T.et al., 2006: Kartierung der Saturn-Eismonde: Erste Ergebnisse der amerikanisch/europäischen Cassini/Huygens Mission. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, 2, 115-126.
- SCHOLTEN, F. et al., 2005: Mars Express HRSC Data Processing Methods and Operational Aspects. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 71, 1143-1152.
- WÄHLISCH, M. et al., 1996: Digital Terrain Models and Rectified Color Ratio Mosaics in the Mare Orientale Region derived from Clementine Image Data. Lunar and Planetary Science, Volume 27, 1369.
- WÄHLISCH, M. et al., 1999: High Resolution Mosaic and Digital Terrain Model in the Lunar South Pole Region derived from Clementine Data. Lunar and Planetary Science XXX, 1636.pdf.
- ZEITLER, W. & OBERST, J., 1999: The shape of Mars before Global Surveyor: Results from reanalysis of the Viking control point network. Journal of Geophysical Research, Vol. 104, E6, 14051-14063.

# Zur geometrischen und radiometrischen Modellierung der Mars-Oberfläche aus HRSC-Daten

#### STEPHAN GEHRKE<sup>1</sup>

**Zusammenfassung:** Die High Resolution Stereo Camera (HRSC) auf Mars Express liefert multispektrale Bilddaten der Mars-Oberfläche in Stereowinkeln von maximal 18,9°, auf deren Grundlage systematisch Digitale Geländemodelle (DGMs) und farbige Orthobilder erstellt werden. Ziel dieser Arbeit ist es, das große Potential der HRSC-Daten – die Aufnahme der Mars-Oberfläche aus bis zu neun verschiedenen Richtungen innerhalb eines Orbits – noch besser auszunutzen und die geometrische und radiometrische Modellierung zusammenzuführen. Ein photogrammetrischer Auswerteansatz, welcher die Bestimmung von DGM und Orthobild integriert, ist das Facetten-Steoreosehen (Matching im Objektraum). Mit der Erweiterung um richtungsabhängige Reflexionsmodelle lassen sich darüber hinaus materialspezifische Parameter ableiten. Durch die gemeinsame Modellierung von Topographie und Oberflächenaufbau werden Zusammenhänge implizit berücksichtigt. Die Regularisierung der DGM-Berechnung wird hier im Zusammenhang mit der Einbindung empirischer Reflexionsmodelle untersucht.

## 1 Einleitung

Bilddaten wie die der *High Resolution Stereo Camera* (HRSC) an Bord der europäischen Raumfahrtmission *Mars Express* leisten einen wesentlichen Beitrag zur Analyse der endogenen und exogenen Prozesse, welche die Mars-Oberfläche geformt haben. Mit der HRSC kann die Oberfläche unseres Nachbarplaneten erstmals systematisch dreidimensional erfasst werden: Innerhalb eines Orbits werden fünf panchromatische Kanäle und vier Farbkanäle in Stereowinkeln von bis zu 18,9° quasi-simultan aufgenommen (NEUKUM et al. 2004, JAU-MANN et al. 2007). Damit bietet sich nicht nur die Möglichkeit, ein Digitales Geländemodell (DGM) abzuleiten, sondern darüber hinaus auch Richtungsabhängigkeiten in der Reflexion zu erfassen und damit auf Materialeigenschaften zurück zu schließen, insbesondere wenn mehrere Orbits desselben Gebiets zur Verfügung stehen.

Aus sämtlichen HRSC-Daten werden am *Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (DLR) systematisch DGMs und Orthobilder abgeleitet (SCHOLTEN et al. 2005). Gegenstand dieser Untersuchung ist die Integration von geometrischer und radiometrischer Modellierung der Mars-Oberfläche basierend auf dem Facetten-Stereosehen (WROBEL 1987, WEISENSEE 1992). Erste Anwendungen auf HRSC-Daten von GEHRKE & HAASE (2006) und HAASE (2007) führten bereits zu plausiblen Resultaten. Dennoch bieten sich verschiedene Möglichkeiten zur Verbesserung der Ergebnisse, insbesondere in Bezug auf die DGM-Genauigkeit, und zur Erweiterung des Algorithmus: Die Glättung der HRSC-Bildedaten kann Fehlzuordnungen reduzieren. Gleiches gilt für eine Filterung des DGMs während der sukzessiven Berechnung – einzelne Ausreißer lassen sich durch Medianfilter eliminieren (GEHRKE & BISCHOFF 2007). Im Folgenden werden die Regularisierung der DGM-Berechnung sowie die Ableitung von Reflexionseigenschaften aus empirischen Modellen wie Lunar-Lambert untersucht. Dieses kann in Teilbereichen stellvertretend für komplexere Modelle stehen und ist damit ein Schritt hin zur vollständigen Beschreibung der Mars-Oberfläche. Durch die gemeinsame Bestimmung der Geometrie und Radiometrie werden die Zusammenhänge implizit berücksichtigt.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Technische Universität Berlin, Institut f
ür Geod
äsie und Geoinformationstechnik, Sekretariat H12, Stra
ße des 17. Juni 135, D-10623 Berlin. E-Mail: stephan@igg.tu-berlin.de.
## 2 Ein Ansatz zur vollständigen Oberflächenmodellierung

Für die geometrische und radiometrische Modellierung der Mars-Oberfläche wird vom photogrammetrischen Ansatz des Facetten-Stereosehens ausgegangen, welcher grundsätzlich die Bestimmung von Orthobild und DGM erlaubt. Die Ableitung materialspezifischer Oberflächeneigenschaften lässt sich in den Berechnungsablauf integrieren.

### 2.1 Objektmodelle

Eine beliebige natürliche Oberfläche wird durch ihre Form und ihre Zusammensetzung charakterisiert, d.h. durch die Topographie (DGM) und die Eigenschaften der Materialien, aus denen sie aufgebaut ist. Dabei können z.B. Albedo, Oberflächenrauigkeit und Korngrößen aus Reflexionseigenschaften abgeleitet werden (vgl. 2.2.6). Sowohl für die Bestimmung des DGM als auch die Parametrisierung von Reflexionsmodellen sind also Bilddaten aus verschiedenen Richtungen nötig, wie sie durch die HRSC systematisch aufgenommen werden. Ein Orthobild entsteht durch die differentielle Entzerrung eines oder mehrerer dieser Bilder, gibt also die Oberfläche unter der bei der Bildaufnahme herrschenden Bestrahlungs- und Beobachtungsgeometrie wieder. Während es geometrisch einer Orthogonalprojektion entspricht, resultiert die Radiometrie (Bildgrauwerte bzw. Reflektanzgrößen) sowohl aus der Topographie als auch aus Materialeigenschaften.

Zusammenfassend lassen sich aus den HRSC-Bildern folgende Objektmodelle ableiten:

- Digitales Geländemodell (DGM)
- Materialparameter (Reflexionsmodell)
- Orthobild

Diese Modelle werden üblicherweise bezüglich eines regelmäßigen Lagerasters bestimmt. Die Auflösung des Orthobildes (Größe eines Surfels = "surface element") orientiert sich an der Pixelgröße der Bilddaten, das DGM und auch die Parameter eines Reflexionsmodells werden üblicherweise in größeren Facetten bestimmt. Je nach Oberflächenbeschaffenheit kann es dabei genügen, den Geltungsbereich einzelner Parameter für das gesamte (in diesem Rahmen kleine) Auswertegebiet festzulegen.

### 2.2 Modellierung der Reflexionseigenschaften

Die Reflexionseigenschaften einer Oberfläche können aus geeigneten Fernerkundungsdaten an Hand photometrischer Gesetze abgeleitet werden; diese beinhalten grundsätzlich einen Albedo-Parameter als Proportionalitätskonstante und unterscheiden sich in der Berücksichtigung der Reflexionsgeometrie (und damit auch der Geländetopographie), vor allem aber in der Anzahl weiterer Parameter. Nachfolgend wird ein Überblick über die dieser Arbeit zu Grunde liegenden Modelle gegeben; Details finden sich in MCEWEN (1991), HAPKE (1993) oder, in Bezug auf die Mars-Oberfläche, in JOHNSON et al. (2007).

Die Modellparameter werden hier mittels Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt, wobei die Reflexionsgeometrie – Sonnenstand und äußere Orientierung der HRSC – bekannt ist und die benötigten Geländehöhen gemeinsam mit den Reflexionsmodellen sukzessive verfeinert werden (vgl. Kapitel 2.4).

### 2.2.1 Reflexionsgeometrie

Das Reflexionsverhalten hängt von der Bestrahlungsgeometrie (einfallende Strahlung, Index i) und der Beobachtungsgeometrie (reflektierte Strahlung, Index r) ab, die sich entsprechend Abbildung 1 als Polarkoordinaten, ( $\phi_i$ , $\theta_i$ ) bzw. ( $\phi_r$ , $\theta_r$ ), darstellen lassen. Der Winkel zwischen dem einfallenden und dem reflektierten Strahl wird als Phasenwinkel  $\alpha$  bezeichnet.



Abbildung 1: Geometrie der einfallenden und der an einer Geländeoberfläche reflektierten Strahlung

Einfallende und reflektierte (beobachtete) Strahlung müssen über ihre jeweiligen Raumwinkel  $\omega_i$  und  $\omega_r$  betrachtet werden. Dabei können sowohl die Sonne als Strahlungsquelle als auch der Sensor, d.h. ein Pixel in der Kamera, als punktförmig angesehen werden, woraus bidirektionale Reflexion resultiert.

#### 2.2.2 Reflexionsfaktor RADF

Die HRSC ist derart kalibriert, dass aufgezeichnete Intensitäten (Bildgrauwerte G',G'',...) linear in den RADF ("radiance factor") nach HAPKE (1993), im Folgenden als r bezeichnet, transformiert werden können (JAUMANN et al., 2007). Dieser entspricht dem Verhältnis der von der Oberfläche reflektierten Strahlung ( $\theta_i$ , $\theta_r$ ) zu der eines vollkommen mattweißen Materials unter senkrechter Bestrahlung (0, $\theta_r$ ), darf also nicht mit dem bidirektionalen Reflexionsfaktor (Strahldichtefaktor)  $\beta$  nach DIN 5036-1 verwechselt werden, da dieser identische Reflexionsgeometrien zwischen Oberfläche und Referenz impliziert; damit gilt:  $r = \beta \cos \theta_i$ . Die folgenden planetaren Reflexionsgesetze werden abhängig vom RADF formuliert.

#### 2.2.3 Lambertsches Kosinusgesetz

Das Lambert-Gesetz beschreibt den Fall isotroper Reflexion, deren Stärke lediglich vom Bestrahlungswinkel und dem Reflexionsvermögen der Oberfläche, der Albedo A, abhängt:

$$\mathbf{r} = \mathbf{A}\cos\theta_{i} \tag{1}$$

Auf Grund seiner Einfachheit ist das Lambert-Modell weit verbreitet, auch wenn es natürliche Oberflächen nur näherungsweise modelliert.

#### 2.2.4 Lommel-Seeliger-Modell

Im Lommel-Seeliger-Modell werden gegenüber (1) Wechselwirkungen in oberflächennahen Schichten berücksichtigt. Strahlung wird dabei sowohl bei ihrem Eintritt als auch bei ihrem Wiederaustritt in Abhängigkeit vom jeweiligen Winkel gedämpft:

$$r = A \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_i + \cos \theta_r}$$
(2)

Diese Reflexionsgeometrie ist die Basis für eine Reihe komplexer Reflexionsmodelle.

#### 2.2.5 Lunar-Lambert-Modell

Das Reflexionsverhalten vieler Himmelskörper, insbesondere des Mondes, kann an Hand des Lunar-Lambert-Modells ("lunar-like function") beschrieben werden. Es stellt eine Linear-

kombination von (1) und (2) dar und weist zwei unabhängige Parameter, die Albedo A und einen Gewichtungsfaktor L, auf:

$$r = A \left[ 2L \frac{\cos \theta_{i}}{\cos \theta_{i} + \cos \theta_{r}} + (1 - L) \cos \theta_{i} \right]$$
(3)

#### 2.2.6 Reflexionsgesetz von Hapke

Eine detaillierte Beschreibung des Reflexionsverhaltens einer natürlichen Oberfläche basiert auf den Eigenschaften der oberflächennahen Teilchen. Im Modell von HAPKE (1993) wird die Reflexion an einem Partikel an Hand der Teilchenalbedo w beschrieben und ihre richtungsabhängige Verteilung (Anisotropie) als Phasenfunktion P( $\alpha$ ) modelliert. Mehrfachreflexionen werden durch so genannte H-Funktionen berücksichtigt. Weitere Modellparameter beschreiben den Oppositionseffekt B( $\alpha$ ), d.h. einen starken Helligkeitsanstieg für  $\alpha \rightarrow 0$  (Mitlichteffekt), sowie die Oberflächenrauigkeit als Funktion eines mittleren Neigungswinkels, S( $\overline{\theta}$ ):

$$r = \frac{w}{4} \frac{\cos \theta_{i}}{\cos \theta_{i} + \cos \theta_{r}} \left\{ \left[ 1 + B(\alpha) \right] P(\alpha) + H(\theta_{i}) H(\theta_{r}) - 1 \right\} S(\overline{\theta})$$
(4)

Die bis zu acht Modellparameter lassen sich nur bei geeigneter Reflexionsgeometrie, d.h. einem großen Phasenwinkelbereich, bestimmen. Sie sind mehr oder weniger stark korreliert. Das sehr komplexe Hapke-Modell kann durch das einfachere Lunar-Lambert-Modell approximiert werden, wenn sowohl die Albedo als auch der Gewichtungsfaktor in Gleichung (3) als phasenwinkelabhängige Parameter angesetzt werden (MCEWEN, 1991). Die richtungsabhängig modellierte Albedo A( $\alpha$ ) hängt mit der Teilchenalbedo w und der Phasenfunktion P( $\alpha$ ) zusammen, der Parameter L( $\alpha$ ) mit der Oberflächenrauigkeit: Mit steigendem Phasenwinkel nehmen die durch Rauigkeit verursachten Schattierungen zu, die Oberfläche erscheint dunkler ("limb darkening") und L( $\alpha$ ) nimmt ab. Diese Vereinfachung wird u.a. in KIRK et al. (2004) angesetzt und findet auch im Rahmen dieser Arbeit Anwendung. Die so bestimmten Lunar-Lambert-Parameter könnten beispielsweise als Grundlage für die Bestimmung des vollständigen Hapke-Modells dienen.

#### 2.3 Geometrische Modellierung auf Basis des Facetten-Stereosehens

Das Facetten-Stereosehen ist ein flexibler Ansatz zur objektraumbasierten Bildauswertung. Die traditionellen Einzelschritte der Bildzuordnung, Objektpunktbestimmung, Oberflächenmodellierung und Orthoprojektion werden unter Verwendung der gesamten Bildinformation, d.h. sämtlicher Pixel, integriert. So lassen sich die Zusammenhänge zwischen Objektgeometrie und -radiometrie implizit berücksichtigen, obwohl in den meisten (photogrammetrischen) Anwendungen die DGM-Bestimmung im Vordergrund steht.

Der Algorithmus wurde von WROBEL (1987, 1989) vorgestellt und u.a. von WEISENSEE (1992), WROBEL et al. (1992) sowie SCHLÜTER (1999) weiterentwickelt. Die Auswertung von HRSC-Daten der Mars-Oberfläche ist in GEHRKE & HAASE (2006) sowie HAASE (2007) beschrieben und wird im Folgenden zusammenfassend wiedergegeben.

#### 2.3.1 Vorgehensweise zur Auswertung von HRSC-Daten

In Anlehnung an WEISENSEE (1992) werden HRSC-Daten der Mars-Oberfläche nach dem indirekten, gruppenweisen Ansatz des Facetten-Stereosehens ausgewertet. Orthobild und DGM werden dabei aufeinander aufbauend iterativ abgeleitet bzw. verfeinert.

Aus den Näherungshöhen  $Z_{ij}^0$  des DGM-Rasters werden die Koordinaten ( $X_i^0, Y_i^0, z_i^0$ ) für jedes Surfel interpoliert und – unter Verwendung der durch Bündelblockausgleichung verbesserten

Orientierungsdaten (SPIEGEL et al. 2005) – in die einzelnen HRSC-Bildstreifen projiziert, so dass für jeden Streifen ein korrespondierendes Pseudo-Orthobild (r', r'', usw.) interpoliert werden kann. Das Orthobild r der Mars-Oberfläche erhält man nach radiometrischer Anpassung (siehe Kapitel 2.4) als Mittelbild. Ausgehend von den Pseudo-Orthobildern werden die unbekannten Höhen  $Z_{ij}$  in den Stützstellen ( $X_{ij}, Y_{ij}$ ) des DGM in einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate abgeleitet (siehe auch Abbildung 2). Die Ausgleichung basiert auf der Taylorreihenentwicklung von r in einem Surfel:

$$r(X,Y) = r(X^{0} + dX, Y^{0} + dY) \approx r(X^{0}, Y^{0}) + \frac{\partial r(X^{0}, Y^{0})}{\partial X} dX + \frac{\partial r(X^{0}, Y^{0})}{\partial Y} dY$$
(5)

Bildpixel und Objektsurfel sind über die Kamerapositionen und -orientierungen miteinander verknüpft: Ein Projektionsstrahl verläuft zwischen Objektpunkt  $(X^0, Y^0, Z^0)$  und Kameraposition  $(X'_0, Y'_0, Z'_0)$  und es gilt:

$$dX = \frac{\partial X}{\partial Z} dZ = \frac{X^0 - X'_0}{Z^0 - Z'_0} dZ \quad , \quad dY = \frac{\partial Y}{\partial Z} dZ = \frac{Y^0 - Y'_0}{Z^0 - Z'_0} dZ \tag{6}$$

Dies führt zur Grundgleichung des Facetten-Stereosehens, welche die Höhenänderungen dZ in den Surfeln mit den Reflexionsfaktoren r', r'', ... der Pseudo-Orthobilder verknüpft:

$$r'(X',Y') = r(X^{0},Y^{0}) + \left[\frac{\partial r(X^{0},Y^{0})}{\partial X}\frac{X^{0} - X'_{0}}{Z^{0} - Z'_{0}} + \frac{\partial r(X^{0},Y^{0})}{\partial Y}\frac{Y^{0} - Y'_{0}}{Z^{0} - Z'_{0}}\right]dZ$$
(7)

Die unbekannten Höhenzuschläge dZij können, nach Einsetzen der bilinearen Interpolation

$$dZ(X^0, Y^0) = \sum_{i} \sum_{j} \alpha_{ij} (X^0, Y^0) dZ_{ij}$$
(8)

in die Grundgleichung (7), mittels Ausgleichungsrechnung geschätzt werden; die benötigten RADF-Gradienten können aus einer entsprechenden Faltung des gemittelten Orthobildes abgeleitet werden (WEISENSEE 1992). Der gesamte Algorithmus muss iterativ, beginnend mit der Berechnung der Pseudobeobachtungen, ausgeführt werden, bis keine signifikanten Höhenänderungen mehr auftreten. Dabei hat es sich als günstig erwiesen, die Facettengröße des DGM sukzessive zu verkleinern. So ist die Punktzuordnung auch bei vergleichsweise ungenauen Startwerten gewährleistet (GEHRKE & HAASE 2006). Hier werden Anfangshöhen aus dem *Mars Observer Laser Altimeter* (MOLA) DGM (SMITH et al. 2001) in 5 km Auflösung verwendet.

#### 2.3.2 Regularisierung

Insbesondere in texturarmen Regionen bereitet die Bildzuordnung Probleme und es ist notwendig, die DGM-Berechnung zu stabilisieren. Dies kann zwar zu einem gewissen Grad durch geeignete Filterung während der sukzessiven Verfeinerung erreicht werden (GEHRKE & BISCHOFF 2006), grundsätzlich ist aber die Einführung von Glattheitsbedingungen in die Ausgleichung von Vorteil. Dazu bieten sich Krümmungsminimierung oder adaptive Regularisierung (WROBEL et al. 1992, SCHLÜTER 1999) an, wobei erstere Bedingungen an die absoluten Höhen und letztere an die Zuschläge aus der Ausgleichung stellt. Formal kann die Glattheitsforderung ausgedrückt werden als Differenz zwischen einer DGM-Höhe zur Verbindungsgeraden der Nachbarpunkte, jeweils in X- und Y-Richtung:

$$0 = Z_{i-1,j} + Z_{i+1,j} - 2Z_{ij} \quad , \quad 0 = Z_{i,j-1} + Z_{i,j+1} - 2Z_{ij}$$
(9)

Diese Bedingungen führen sowohl adaptiv als auch krümmungsminimierend zu ähnlichen Ergebnissen (SCHLÜTER 1999), von Bedeutung ist eher die Gewichtung in den einzelnen Stützstellen: Schlecht bestimmte bzw. bestimmbare Höhen sollten einem stärkeren Zwang unterliegen als gut bestimmte; hier werden größere Knicke zugelassen. Als Gewichte eignen sich demnach die (inversen) mittleren Fehler der einzelnen Höhen aber auch die (inversen) Grauwertgradienten. Diese bestimmen entsprechend Gleichung (7) wesentlich die Designmatrix der Ausgleichung und sind daher eng mit den mittleren Fehlern verknüpft, bieten jedoch den Vorteil, dass richtungsabhängig unterschiedlich gewichtet werden kann. Dies wird für die praktischen Untersuchungen in Kapitel 3 ausgenutzt.

### 2.4 Verknüpfung von geometrischer und radiometrischer Modellierung

Um eine optimale Bildzuordnung zu ermöglichen, müssen Bilddaten sowohl geometrisch als auch radiometrisch angepasst sein. Im Facetten-Stereosehen ist die geometrische Anpassung durch die Pseudo-Orthobilder gegeben; radiometrisch werden diese an Hand von Transferfunktionen angeglichen. Grundsätzlich müssen dabei sämtliche Unterschiede in den Bilddaten modelliert werden, die sich aus der richtungsabhängigen Reflexion, der Atmosphäre sowie Restfehlern der Kamerakalibrierung zusammensetzen. Traditionell werden solche Einflüsse durch lineare Funktionen beschrieben (WEISENSEE 1988, WROBEL 1989, WEISENSEE 1992): Beispielsweise lässt sich der Atmosphäreneinfluss in optische Dichte (multiplikativ) und Luftlicht (additiv) trennen; Richtungsunterschiede in der Reflexion können lokal – d.h. bei konstanter Geometrie und Materialeigenschaften, also in Bezug auf eine als eben angenommene Facette – durch einen Faktor modelliert werden. Lineare Transferfunktionen stellen eine Histogrammanpassung der einzelnen Bilder dar, wobei die Radiometrie des gemittelten Orthobildes dem Referenzbild entspricht – im Fall der HRSC zweckmäßigerweise dem Nadir-Kanal, der in der Regel in höchster Auflösung aufgenommen wird.

Für die gemeinsame radiometrische und geometrische Modellierung ist in den iterativen, gruppenweisen Ansatz des Facetten-Stereosehens entsprechend Kapitel 2.3 die Ableitung von Reflexionseigenschaften zu integrieren (vgl. Abbildung 2). Charakteristisch ist dabei die Verlagerung des Matching-Prozesses in den Objektraum, basierend auf sowohl geometrisch als auch radiometrisch "unverzerrten" Bildern.



Abbildung 2: Radiometrische und geometrische Modellierung der Mars-Oberfläche aus HRSC-Daten.

Werden die Parameter eines Reflexionsmodells im Zusammenhang mit der Objektgeometrie bestimmt, macht es Sinn, die radiometrische Anpassung durch De- und Re-Shading vorzunehmen, d.h. Richtungsabhängkeiten in der Reflexion aus den Pseudo-Orthobildern herauszurechnen und anschließend die für das endgültige Orthobild definierte Reflexionsgeometrie (z.B. die des Nadir-Kanals) anzubringen. Ein geeignetes Modell vorausgesetzt, kann dieses Vorgehen potentiell Reflexionsvorgänge wirklich modellieren statt als Teil "beliebiger" linearer Funktionen auszudrücken; es ist daher Gegenstand weiterführender Forschung.



Abbildung 3: Überlagerung von Höhenlinien und Orthobild des gesamten Kraters (25,0 km x 25,0 km)

## 3 Auswertung von HRSC-Daten der Mars-Oberfläche

### 3.1 Testgebiet

Für die praktische Untersuchung wird der bereits von GEHRKE & HAASE (2006) bearbeitete unbenannte Einschlagkrater bei 313,4° Ost und 9,0° Nord herangezogen (Abbildung 3). Das Gebiet wurde von der HRSC im *Mars Express* Orbit 894 aufgenommen. Hier werden die fünf

panchromatischen Kanäle in unterschiedlichen Stereowinkeln verwendet. Die Auflösungen schwanken auf Grund der Makropixelformate – Nadir: 1x1 (volle Auflösung), Stereo: 2x2, Photometrie: 4x4 – und der Flughöhe, vgl. Tabelle 1; die dort angegebene Reflexionsgeometrie bezieht sich auf einen 4,8 km x 4,8 km großen Ausschnitt am südlichen Kraterrand.

Kanal	Auflösung	Stereowinkel	Beobacht. $\theta_r$	Bestrahl. $\theta_i$	Phasenw. α
	[m]	[°]	[°]	[°]	[°]
Stereo_1	36,3	18,9	0,0-52,1	43,8 - 90,0	59,5 - 60,0
Photo_1	68,5	12,9	0,0-44,7	43,8 - 90,0	61,4 - 61,9
Nadir	15,9	0,0	0,0-38,8	44,0 - 90,0	66,6 - 67,1
Photo_2	63,1	12,9	0,0-53,4	44,1 - 90,0	73,0-73,5
Stereo_2	32,0	18,9	0,0-60,5	44,1 - 90,0	76,5 - 77,0

Tabelle 1: Aufnahmegeometrie der panchromatischen HRSC-Kanäle im Orbit 894

Die Bestrahlungs- und Beobachtungswinkel weisen auf Grund der lokalen Geländeneigungen am Kraterrand eine große Bandbreite auf, die Phasenwinkel sind pro Bildausschnitt nahezu konstant. Während durch den niedrigen Sonnenstand vereinzelt Schatten auftreten, gibt es keine sichttoten Räume und die topologische Äquivalenz der Bilddaten ist gegeben.

## 3.2 Vorgehensweise

Der Berechnungsablauf basiert auf dem in Abbildung 2 angegebenen Schema: Ausgehend von MOLA-Höhen werden sämtliche Ergebnisse gruppenweise und iterativ berechnet, wobei die DGM-Facetten sukzessive bis auf 4x4 Surfel des Orthobildes verkleinert werden. Das in Abbildung 3 dargestellte Gebiet basiert auf dem Nadir- und den beiden Stereokanälen der HRSC und wurde aus insgesamt 11x11 einzelnen Fenstern zusammengesetzt; die Orthobildauflösung beträgt 20 m/Pixel, die endgültige Facettengröße des DGMs 80 m.

Die gemeinsame radiometrische und geometrische Modellierung für den südlichen Teil des Kraterrandes basiert auf allen fünf Kanälen. Dabei wurden unterschiedliche Gewichtungen der Regularisierung entsprechend Gleichung (9) gegenüber der Grundgleichung (7) untersucht und immer ein Orthobild mit 50 m/Pixel, ein DGM in 200 m Auflösung sowie die Albedo in 100 m großen Facetten bestimmt, jeweils für das Lambert-, Lommel-Seeliger und Lunar-Lambert-Modell. Während im letzten Modell ein phasenwinkelabhängiger Limb-Darkening-Parameter L<sub> $\alpha$ </sub> für jeden Bildausschnitt angesetzt wurde, ist eine Richtungsabhängigkeit der Albedo hier nicht bestimmbar; sie wird als konstant angenommen. Eine ausgeprägte Vorwärts- oder Rückwärtsstreuung würde sich auf mittlere Phasenwinkelbereich vergleichsweise klein ist.

## 3.3 Ergebnisse der geometrischen und radiometrischen Modellierung

Mit dem Ziel, plausible Resultate für die Objektgeometrie und Materialparameter abzuleiten, wurde ein optimaler Gewichtungsfaktor  $\lambda_0$  der DGM-Regularisierung gesuch – sowohl an Hand der nachfolgend dargestellten Ergebnisse als auch durch die Erfahrung aus dem *HRSC DTM Test* (HEIPKE et al. 2007) und den Vergleich mit anderweitig berechneten DGMs in diesem Gebiet (siehe dazu auch GEHRKE & HAASE 2006). Es wurden zwei Berechnungen im Bereich von  $\lambda_0$  und je eine mit starker und schwacher Regularisierung durchgeführt. In Abbildung 4 sind die resultierenden DGMs, Orthobilder mit abgeleiteten Höhenlinien in 50 m Äquidistanz sowie mit dem Lunar-Lambert-Modell berechnete Albedo-Karten gegenübergestellt; Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Parameter verschiedener Reflexionsmodelle. An Hand dieser Daten lassen sich folgende Feststellungen treffen:

• Unterschiede zwischen den einzelnen Orthobildern sind praktisch nicht erkennbar. Korrelationskoeffizienten liegen über 99,97 %, die Abweichung zwischen einzelnen RADF-Werten bei maximal 2,4 %.



Abbildung 4: Perspektivansichten der DGMs, Orthobilder mit Höhenlinien und Lunar-Lambert-Albedos aus verschiedenen DGM-Regularisierungen, von oben nach unten:  $300 \lambda_0$ ,  $3 \lambda_0$ ,  $0,3 \lambda_0$  und  $0,003 \lambda_0$ 

Regularisierung	300 λ <sub>0</sub>	3 λ <sub>0</sub>	0,3 λ <sub>0</sub>	0,003 λ <sub>0</sub>
Albedo (Median):				
Lambert	$0,\!274\pm0,\!004$	$0,\!286 \pm 0,\!009$	$0,\!284 \pm 0,\!011$	$0,\!284 \pm 0,\!012$
Lommel-Seeliger	$0,\!368\pm0,\!008$	$0,\!377 \pm 0,\!014$	$0,375 \pm 0,016$	$0,\!375 \pm 0,\!017$
Lunar-Lambert	$0{,}260\pm0{,}002$	$0,253 \pm 0,008$	$0,\!243 \pm 0,\!009$	$0{,}243\pm0{,}010$
Streuung der Albedo:				
Lambert	23,0 %	19,4 %	20,2 %	23,0 %
Lommel-Seeliger	15,0 %	13,4 %	14,1 %	16,3 %
Lunar-Lambert	21,0 %	16,6 %	16,8 %	19,5 %
Limb-Darkening:				
L <sub>α=59,7°</sub> (Stereo_1)	$0,201 \pm 0,002$	$0,\!384\pm0,\!007$	$0,\!420 \pm 0,\!009$	$0,\!405 \pm 0,\!009$
$L_{\alpha=61,7^{\circ}}$ (Photo_1)	$0,\!173\pm0,\!002$	$0,\!332\pm0,\!008$	$0,\!412 \pm 0,\!009$	$0{,}406\pm0{,}010$
L a=66,8° (Nadir)	$0{,}042\pm0{,}002$	$0,202 \pm 0,007$	$0,\!281 \pm 0,\!009$	$0,\!282 \pm 0,\!009$
L <sub>α=73,3°</sub> (Photo_2)	$0,\!096\pm0,\!002$	$0,233 \pm 0,006$	$0,\!300\pm0,\!008$	$0{,}297\pm0{,}008$
L <sub>α=76,7°</sub> (Stereo_2)	$0,\!074\pm0,\!002$	$0,\!194\pm0,\!006$	$0,251 \pm 0,007$	$0{,}248\pm0{,}007$

Tabelle 2: Reflexionsparameter auf der Basis verschiedener DGM-Regularisierungen

- Die mit einem Gewicht von 3  $\lambda_0$  und 0,3  $\lambda_0$  regularisierten DGMs stellen aussagekräftige Repräsentationen des Kraters dar; die mittleren Fehler der einzelnen Höhendifferenzen liegen mit 21,3 m im Bereich der Genauigkeit der Ausgleichungen. Sie nehmen sowohl bei stärkerer als auch bei schwächerer Regularisierung auf das etwa dreifache zu; die einzelnen Höhenwerte der betreffenden DGMs weisen dann also signifikante Unterschiede auf. Wie zu erwarten, verbleibt bei schwacher Regularisierung noch Rauschen und eine starke Regularisierung führt zu einem sehr glatten Geländeverlauf. Hier ist auf Grund der texturabhängigen Gewichtung der eigentliche Kraterrand zwar immer noch gut erkennbar, dennoch wölbt sich das Gebiet insgesamt auf und liegt im Durchschnitt ca. 13 m höher als alle anderen DGMs, die untereinander nur geringe Höhenunterschiede von weniger als 1 m aufweisen.
- Die Albedo-Werte aus den einzelnen Reflexionsmodellen sind bei allen Berechnungen nahezu konstant, wobei die Signifikanz im Lunar-Lambert-Gesetz, welches die meisten Freiheitsgrade aufweist, durchweg am größten ist. Die Streuung über das Bearbeitungsgebiet ist bei optimaler DGM-Regularisierung am geringsten. Die in den Orthobildern klar erkennbaren Schatten tauchen im glatten, stark regularisierten DGM nicht auf und die Albedo wird an diesen Stellen fehlerhaft bestimmt. Die L-Werte steigen mit abnehmendem Gewicht λ an, solange λ > λ<sub>0</sub> ist. Die Phasenwinkelabhängigkeit wird im folgenden Kapitel näher untersucht.

Diese Ergebnisse bestätigen die Wahl des optimalen Gewichts  $\lambda_0$  für die Regularisierung. Es zeigt sich auch, dass das Lunar-Lambert-Modell zur radiometrischen Modellierung dieses Teils der Mars-Oberfläche besser geeignet ist als beispielsweise das weit verbreite Lambert-Gesetz.

### 3.4 Verknüpfung zwischen Reflexionsparametern und Materialeigenschaften

Die Albedo- und Limb-Darkening-Werte des Lommel-Seeliger-Modells (Tabelle 2) erlauben Rückschlüsse auf die materialspezifischen Parameter des Hapke-Modells (vgl. Kapitel 2.2.6).

In Anlehnung an MCEWEN (1993) wurde daher das Hapke-Modell mit unterschiedlichen Parametern für Phasenwinkel von 0° bis 100° – mit jeweils allen möglichen Kombinationen von Bestrahlungs- und Beobachtungswinkeln – berechnet und jeweils durch das Lunar-Lambert-Modell approximiert, sodass sich phasenwinkelabhängige Funktionen für A und L ergeben. In Abbildung 5 sind zwei solcher Kurven dargestellt, die das an Hand der Berechnungen mit 3  $\lambda_0$  und 0,3  $\lambda_0$  ermittelte Limb-Darkening-Verhalten sowie die Albedo (nicht im Diagramm) modellieren. Zusätzlich zu dieser theoretischen Untersuchung ist ein von MCEWEN (1995) für die Mond-Oberfläche gefundenes kubisches Polynom dargestellt.



Abbildung 5: Modellierung der Phasenwinkelabhängkeit des Lunar-Lambert-Parameters L

Aus Abbildung 5 wird deutlich, dass die praktisch bestimmten Parameter gut durch theoretische Kurven angenähert werden können, wobei die aus dem Nadirkanal der HRSC abgeleiteten L-Werte etwas zu niedrig erscheinen. Damit ergeben sich für das Untersuchungsgebiet eine Teilchenalbedo von ca. 0,73-0,75 sowie eine Oberflächenrauigkeit im Bereich von 7-11°. Diese Ergebnisse sind, beispielsweise im Vergleich mit den von JEHL et al. (2006) im Bereich des Gusev-Kraters bestimmten Parametern, plausibel. Sie können als Startwerte für die Ableitung des vollständigen Hapke-Modells dienen.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dieser Arbeit wurde ein Beitrag zur ganzheitlichen Beschreibung der Mars-Oberfläche in Form von DGM, Orthobild und Materialeigenschaften geleistet. Basierend auf dem photogrammetrischen Ansatz des Facetten-Stereosehens konnten plausible Oberflächenmodelle für einen Einschlagkrater abgeleitet werden.

Die Untersuchungen zeigen aber auch, dass der hier vorgestellte Ansatz noch Potenzial hat. Beispielsweise kann das Oberflächenmaterial durch die Parameter des Hapke-Modells besser charakterisiert werden als mit empirischen Gesetzen, welche jedoch ein Schritt hin zu dieser komplexeren Modellbildung sind. In diesem Zusammenhang ist auch die radiometrische Anpassung der einzelnen Pseudo-Orthobilder durch De- und Re-Shading zu untersuchen.

In der vorgestellten DGM-Ausgleichung werden Bildinhalte an Hand der Gradienten geometrisch zugeordnet – die Tatsache, dass die RADF-Werte erlauben, auf lokale Oberflächenneigungen und damit auch auf die DGM-Höhen zu schließen ("shape from shading"), bleibt dabei jedoch ungenutzt. Die Einführung entsprechender Zusatzbedingungen, basierend auf den ohnehin mitbestimmten Reflexionseigenschaften, erscheint hier viel versprechend.

## 5 Literaturverzeichnis

- DIN 5036-1, 1978: Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien, Teil 1: Begriffe, Kennzahlen. – Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- GEHRKE, S., BISCHOFF, C., 2007: HRSC Data Processing by Matching in Object Space, II. Effects of Image and DTM Filtering. Proceedings ISPRS WG IV/7 Workshop, Houston.
- GEHRKE, S., HAASE, I., 2006: Anwendung des Facetten-Stereosehens auf Bildaten der HRSC auf Mars Express. Vorträge 26. Jahrestagung der DGPF, 15: 45-55.
- HAPKE, B., 1993: Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy. Cambridge University Press, Cambridge.
- HEIPKE, C., et al., 2007: The HRSC DTM Test. Vorträge 27. Jahrestagung der DGPF, 16.
- JAUMANN, R., et al., 2007: The High Resolution Stereo Camera (HRSC) Experiment on Mars Express: Instrument Aspects from Interplanetary Cruise through Nominal Mission. – Planetary and Space Science, im Druck.
- JEHL, A., et al., 2006: Improved Surface Photometric Mapping across Gusev and Apollinaris from an HRSC/Mars Express Integrated Multi-Orbit Dataset: Implication on Hapke Parameters Determination. – LPSC XXXVII, Paper #1219.
- HAASE, I., 2007: Anwendung des Facetten-Stereo-Sehens auf Bilddaten der High Resolution Stereo Camera (HRSC) auf Mars Express. – Diplomarbeit, TU Berlin.
- JOHNSON, J.R., et al., 2007: Physical Properties of the Martian Surface from Spectrophotometric Observations. – In: The Martian Surface: Composition, Mineralogy, and Physical Properties. Cambridge University Press, Cambridge, im Druck.
- KIRK, R.L., et al., 2004: Comparison of USGS and DLR Topographic Models of Comet Borrelly and Photometric Applications. – Icarus, 167: 54-69.
- MCEWEN, A.S., 1991: Photometric Functions for Photoclinometry and Other Applications. Icarus, 92: 298-311.
- MCEWEN, A.S., 1995: A Precise Lunar Photometric Function. LPSC XXVII: 841-842.
- NEUKUM, G., et al., 2004: The High Resolution Stereo Camera of Mars Express. ESA Special Publication, SP-1240.
- SCHLÜTER, M., 1999: Von der 2½D- zur 3D-Flächenmodellierung für die photogrammetrische Rekonstruktion im Objektraum. – Dissertation, DGK-Reihe C, Heft 506.
- SCHOLTEN, F., et al., 2005: Von Rohdaten aus dem Mars Express Orbit zu Digitalen Geländemodellen und Orthobildern – Operationelle Verarbeitung von HRSC Daten. – PFG, 5/2005: 365-372.
- SMITH, D.E., et al., 2001: Mars Orbiter Laser Altimeter: Experiment Summary after the First Year of Global Mapping of Mars. JGR, 106 (E10): 23 689-23 722.
- SPIEGEL, M., et al., 2005: Bündelausgleichung von HRSC-Bilddaten mit Mars Observer Laser Altimeter-Daten als Passinformation. – PFG, 2005(5): 381-386.
- WEISENSEE, M., 1988: Models of Light Reflection for Facet Stereo Vision. IAPRS, 27 (B3/ B10): 360-367.
- WEISENSEE, M., 1992: Modelle und Algorithmen für das Facetten-Stereosehen. Dissertation, DGK-Reihe C, Heft 374.
- WROBEL, B.P., 1987: Digitale Bildzuordnung durch Facetten mit Hilfe von Objektraummodellen. – Bildmessung und Luftbildwesen, 55(3): 93-101.
- WROBEL, B.P., 1989: Geometrisch-physikalische Grundlagen der digitalen Bildmessung. SIPUS, 13: 325-333.
- WROBEL, B.P., et al., 1992: Adaptive Surface Regularization A New Method for Stabilization of Surface Reconstruction from Images. – IAPRS, 29 (B3): 824-831.

# IMAGERY AGGREGATION FOR ENVIRONNEMENTAL CHARACTERISATION OF VINEYARDS

## F. GERVAIX<sup>1</sup> & S. BURGOS<sup>2</sup>

Abstract: This paper presents the intermediate results of a study related to a better understanding and interpretation of the vineyards, in particular in regards of the vigour of the plant at given stage of their growth. The vigour can be quite easily assessed from colour images, as long as the spatial resolution is sufficient (20 cm in this study). The correlation between vigour and soil, topography (slope) or hydrology is demonstrated with simple examples. This first stage is promising and more work has to be done in order to understand the extreme complexity of landscape, where homogeneous areas are not larger than 50'000 m2. Underground characteristics can be assessed through the indication of the vineyards above the ground that can be observed from the air.

## **1. STUDY CONTEXT**

The University of Applied Sciences Western Switzerland(HES-SO) includes an oenology & agronomy school. One of their aims is the best use of the vineyards, according to soil, climate, topography, etc. In particular, the climate is often ignored or badly known. Imagery in general is use for a new inventory in Canton of Geneva, Switzerland. Interestingly, very different types of image are used: 1° aerial, high resolution, RGB & NIR images 2° satellite, low resolution, thermal IR images 3° terrestrial, high resolution, thermal images. The challenge is to match all these data and provide a unique aggregate of data for a given "parchet" (vineyard subdivision). The intermediate results of this on-going project show a great potential and invaluable help for the characterisation of potential of the Geneva vineyard.

## 2. OBJECTIVES OF THE PROJECT

The analyses of *terroir* of the grapevine are actually largely done in many parts of the world. In Switzerland these studies have been done in the canton of VD, VS, NE, GE and TI. Most of them concern the study of the geology and the soil. The aim of these studies is a better knowledge of the relations between the soil and the grapevine. This knowledge will help the wine grower hoosing the wine variety, the rootstock and the way to manage the soil surface. The main characteristics described for each type of soil are water dynamic, deep of the roots, texture, stone content and vigour & precocity potential.

The spatial distribution of the different types of soil is sometimes difficult to determine. The mapping of soil is mainly based on the relief and the geology; the limits are drawn on the basis of auger soil probe. The density of the soil probe varies from 1.5 to 2.5 per ha. This quite high density for a soil mapping is sometime not sufficient when the spatial variation is high. The soils of Geneva vineyards are principally formed on quaternary and tertiary geological parent material. These deposits show an important spatial variability and are at the origin of rapid transitions of soil type.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> HEIG-VD, Geomatics Faculty, Yverdon-les-Bains, Switzerland – francois.gervaix@heig-vd.ch

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Ecole d'Ingénieurs de Changins, Nyon, Switzerland – stephane.burgos@eic.vd.ch

The first aim of this work is to test the possibility of the use of high resolution images to increase the accuracy of the limits of the soil map. The analysis of the grapevine rows should show the variation of vigour of the grapevine. The intensity of the green colour of the canopy is linked to the vigour of the plant. The vigour of the plant is correlated to the fertility of the soil, particularly with the water content and the deepness of the soil. So it should be possible to draw limits based on the colour intensity of the plant.

The second aim is to analyse the intensity of the green coverage between the rows. This should allow, in combination with measurement on the field, to determine the zones with an enhanced risk of erosion. This observation can be combined with the orientation of the rows and the slope direction.

## **3. MATERIAL AND METHODS**

### 3.1 Type of used material

The aerial, high-resolution material was acquired during a wide-area campaign in summer 2005 by the Canton of Geneva. Digital imagery (simultaneously with laser data) was acquired with a Vexcel UltraCamD. The GSD of the raw images is 16-18 cm, allowing a comfortable 20 cm resolution colour orthomosaic. False colour infrared images are available too; they have not been used in this study yet. The corresponding LiDAR data was provided as a regular grid with 2 m interval between posts.

#### 3.2 Image processing

The processing from raw images to orthomosaic has been done in Leica Geosystems' Photogrammetry Suite (LPS) 9.1, including ORIMA. The classification has been done in Leica Geosystems' ERDAS IMAGINE 9.1. The supervised classification had two goals: firstly, aggregate the plants with above-normal vigour (dark green in the image) in one hand, and in the other hand aggregate the plants with a normal vigour (brownish green in the image); secondly, aggregate and dismiss all the pixels belonging to the shadow and the grass between the rows. This phase is important in order to "clean" the image and leave only the plants, ready for interpretation.

### 3.3 Signification of the grapevine "vigour"

The images have been acquired in August, a period when the grapevine is still in growth. A great vigour at this period can be negative for the vine quality because the products of the photosynthesis (e.g. sugar, polyphenols) are use for the growth and will less accumulate in the berries.

## 4. RESULTS AND INTERPRETATION

After a meticulous fine-tuning of the signatures, a thematic image is generated from the high-resolution RGB image (Fig. 1).

This zone is quite typical, with a size of ca. 70 m x 70 m. The different zones of vigour are clearly visible. Narrower signatures were tested, with almost no benefit. The "nonvineyard" zones require as much care as the "vineyard" if not more. Non-useful pixels are aggregated as black and displayed as transparent. The interpretation is mainly the search for the causes of variations of green. These can be dispatched in four cases:



Figure 1: RGB image (left) and 3-class thematic image

1. Soil type and parent material. The soil map, even tough at a much lower resolution, provides useful information.

2. Relief (slope). The slope affects the soil type and the growth of the grapevine. The relief and the soil type are correlated and it is difficult to distinguish the reason of the difference of growth (e.g. deep soil and soft slope are linked with enhanced vigour of the plant).

3. Hydrological functioning of the soil (e.g. high water level, subterranean water circulation).

4. Other, unexplained. Actually, it should read "not explainable from the aerial information".

The superposition of processed images, soil map and DTM provides a pertinent explanation in the cases 1 and 2. Additional field observations may help to explain both other cases.

#### 4.1 Case examples

4.1.1 Case 1: Influence of the soil



Figure 2. Former river bed and trees

There is a tight relationship between a former river bed (deep brown soils with plenty of water supply) and the dark green colour of the vineyards.



### 4.1.2 Case 2: Influence of the relief

Figure 3. Area of vigour and DTM (shaded)

A dark area (more vigorous) in the middle of the parcel can be observed. A closer analysis of the DTM shows a small area with a reduced slope.

## 4.1.3 Case 3: Hydrological feature



Figure 4. Circular spot

This image shows a limited, circular area with superior vigour. The exact origin is unknown, but field observations have shown at many locations water resurgences. To verify this hypothesis, additional field work should be done.

### 4.1.4 Case 4: Other and unexplained effect

In this particular example, the upper part of the image shows a sharp difference in plant vigour and a smooth difference in the lower part. The first one can be explained by a different grape variety, the second one has an unknown origin.



Figure 5. Sharp and smooth limits

## 5. CONCLUSION

The classification of the green intensities allows an immediate distinction between zones with different grapevine vigour. It was explained that the plant vigour has multiple origins that can be summarized in a simple two colours, thematic map.

The limits of the methods are: differential rows orientation (usually along or across the slope), the pruning system and soil management practice, time of image acquisition, relative orientation of the rows and sun direction, size of the vineyard subdivisions.

However, this pragmatic approach allows a quick interpretation of the fragmented landscape. Features that would take a long time to be identified are quasi-immediately visible.

These first results are very encouraging. The accuracy can be improved with a better signature definition (two types so far, should be increased for a more detailed analysis). In the future, this analysis will extended to the corridor between the rows, where erosion can be an issue, depending on the amount of grass left by the exploitation.

## 6. SELECTED BIBLIOGRAPHY

- BARBEAU,G., BOURNAND,S., CHAMPENOIS,R., BOUVET,M.H., BLIN,A. & COSNEAU,M. 2004. The behaviour of four red grapevine varieties of Val de Loire according to climatic variables. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin, 38, 35-40.
- BODIN,F.& MORLAT,R. 2003. Characterizing a vine terroir by combining a pedological field model and a survey of the vine growers in the Anjou region (France). Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin, 37, 199-211.
- HALL,A., LOUIS,J. & LAMB,D. 2003. Characterising and mapping vineyard canopy using highspatial-resolution aerial multispectral images. Computers & Geosciences, 29, 813-822.
- MURISIER, F., BRIGUET, C., LETESSIER, I., PYTHOUD, K. & ZUFFEREY, V. 2004. Etude des terroirs viticoles vaudois. Revue suisse Vitic. Arboric.Hortic., 36, 1-20.

# Konzept eines orbitalen Sensors zur Beobachtung von kurzzeitigen Lichtphänomenen auf dem Mond

#### FALK NOHKA, FRANK BAUMANN, KLAUS BRIES, HAKAN KAYAL<sup>1</sup>

Zusammenfassung:

Transient Lunar Phenomena (TLP) sind kurzzeitige Lichtphänomene auf dem Mond in verschiedener Ausprägung und variabler Dauer.

Es wird zunächst ein Überblick über das Phänomen gegeben und anschließen erläutert, welche Vorteile die Beobachtung aus dem Erdorbit bringt. Danach werden die aus den Charakteristika der bekannten Ereignisse abgeleiteten Anforderungen an einen Sensor vorgestellt. Zum Abschluss wird ein Lösungsansatz diskutiert.

## 1 Einleitung

Ein kontrovers diskutiertes, aber dennoch relativ unbekanntes Phänomen sind die so genannten TLP (Transient Lunar Phenomena) – kurzzeitige, scheinbare Veränderungen auf der Mondoberfläche. Seit dem 15. Jahrhundert gibt es immer wieder Berichte über Lichterscheinungen auf dem Mond, doch nicht zuletzt der lückenhafte Datenbestand und die Beobachtungsbedingungen tragen zur Kontroverse bei, die vor allem unter Astronomen ausgetragen wird. Lange Zeit wurden TLP in einem Atemzug mit UFO-Phänomenen, gefälschten Mondlandungen und ähnlichen Themen genannt, was der Akzeptanz der Erforschung der lunaren Phänomene zu unrecht die Glaubwürdigkeit raubte.

Mittlerweile ist aber auch unter Wissenschaftlern die Existenz von TLP weitestgehend anerkannt, was unter anderem der Verdienst engagierter Amateur- und professioneller Astronomen ist und durch Hinweise aus Messdaten von wissenschaftlichem Gerät verschiedener Mondorbiter gestützt wird.

## 2 Problemstellung

#### 2.1 Beschreibung des Phänomens

TLP werden üblicherweise nach ihrer Auswirkung auf visuelle Eigenschaften von Oberflächenmerkmalen auf dem Mond in fünf Kategorien unterteilt [4].

• Aufhellung:

Ein Oberflächenmerkmal erscheint heller, teils auch blitzartig. Die Intensität des reflektierten Lichts vervielfacht sich.

• Verdunklung (Albedo):

Ein Oberflächenmerkmal erscheint dunkler, ist dabei aber noch zu erkennen. Die Intensität des reflektierten Lichts verringert sich.

• rote Färbung:

Das reflektierte Licht eines Oberflächenmerkmals erscheint rötlich.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Technische Universität Berlin; Institut für Luft und Raumfahrt; Fachgebiet Raumfahrttechnik; Marchstraße 12; 10587 Berlin, Deutschland

• blaue Färbung

Das reflektierte Licht eines Oberflächenmerkmals erscheint bläulich.

• Überdeckung

Ein Oberflächenmerkmal wird scheinbar verdeckt und ist nicht mehr sichtbar.

Das betroffene Gebiet umfasst dabei nur einige Quadratkilometer, wobei die Dauer der Veränderungen von Bruchteilen einer Sekunde bis zu Stunden reicht.

Die Verteilung von TLP über den sichtbaren Mond ist nicht statistisch, vielmehr konzentrieren sich diese auf die Ränder der Meere und nahe vulkanischen Merkmalen, wie Rillen oder Kratern [4]. Darüber hinaus gibt es einige "Hotspots", wie die Region um Aristarchus, Herodotus und Vallis Schröter, der allein ca. ein Drittel der gemeldeten TLP zugeordnet wird. Eine Übersicht über einige Häufungspunkte ist in Abbildung 1 grafisch dargestellt. Insgesamt beläuft sich die Zahl der Oberflächenmerkmale, bei denen mindestens ein TLP Ereignis gesichtet wurde auf rund 200.





Der britische Astronom J. Hedley Robinson hat 1986 mindestens elf mögliche Erklärungen zusammengetragen [2], die hier kurz erläutert werden sollen.

I. Durch Gezeitenkräfte hervorgerufene Spannungen wirken auf im Mondgestein gefangene Gase, die entfliehen um so Spannungen abzubauen. Dabei sind die stärksten Gezeitenkräfte gemeint, die auf den Mond wirken, wenn er im Perigäum zur Erde steht. Dieser Effekt ist bis zu 32,5 mal stärker als der Effekt des Mondes auf die Erde

- II. Änderungen der Albedo aufgrund von Staubbewegungen.
- III. Thermaler Schock aufgrund der Temperaturunterschiede an der Tag-Nacht-Grenze. Dort variiert die Temperatur innerhalb von zwei Stunden zwischen 125°C und -80°C. Die unterschiedliche Ausdehnung des Mondmaterials könnte dazu führen, dass Spannungen im Gestein aufgebaut werden, welche durch Ausgasung (siehe 1. These) ausgeglichen werden könnten.
- IV. Magnetische Wechselwirkungen von solarem Plasmabeschuss und Bewegung des Mondes durch das Erdmagnetfeld.
- V. Ultraviolette Strahlung der Sonne die zur Fluoreszenz im sichtbaren Spektrum anregt, aufgrund der Absenz einer Mond-Atmosphäre.
- VI. Sonnenwind-Plasma bewirkt auf der Oberfläche eine elektrische Entladung.
- VII.Spektrale Beugung an Oberflächenmerkmalen, die für die Auflösung benutzter Teleskope zu klein sind und so Farben erzeugen.
- VIII.Meteor Einschläge.
- IX. Mondbeben, welche eine Ausgasung zur Folge haben.
- X. Falschfarben durch optische Effekte in der Erdatmosphäre.
- XI. Piezoelektrische Effekte durch Spannungen im Gestein, wie es auch auf der Erde beobachtet werden kann.

Zusätzlich dazu kommen in Betracht:

XII.Instrumentenfehler

XIII.Fehlinterpretation durch bewegte Objekte in Erdnähe (Vögel, Flugzeuge, Satelliten)

XIV.Beobachtungsfehler durch den Beobachter.

Die wahrscheinlichsten Theorien sind laut Robinson [2] der piezoelektrische Effekt mit spontaner Entladung bei austretendem Gas, sowie Ionisation eines austretenden Gases durch solare Teilchenstrahlung (Korpuskular-Strahlung). Für beide gibt es konkrete Anhaltspunkte. So wurde durch das AAPS an Bord der Kommandokapseln von Apollo 15 und 16 über vielen Hotspots Radon nachgewiesen [5], wobei die größte Radonquelle über dem Gebiet von Aristarchus und Grimaldi ausgemacht wurde. Dies wird als direkter Hinweis auf zuvor ausgetretenes Gas gewertet. Auch zeigen neue erkenntnisse durch die Auswertung der Daten der amerikanischen Raumsonde "Lunar Prospector", dass es auf der Mondoberfläche zu statischer Aufladung des Mondstaubs kommt, wobei die Spannungen bis zu 4500 V betragen können [10].

#### 2.2 Vorteile der Beobachtung aus dem Erdorbit

Die erdgebundene Beobachtung ist in vielerlei Hinsicht problematisch. Ein entscheidender Faktor ist dabei das Wetter, denn sobald der Himmel bedeckt ist, ist eine Beobachtung unmöglich. Hinzu kommt, dass der Mond Nachts am besten zu beobachten, aber nicht zu jeder Nachtzeit von einem festen Standort aus sichtbar ist.

Sollten obige Bedingungen eine Beobachtung zulassen, besteht immer noch das Problem der "unruhigen Atmosphäre", hervorgerufen durch Turbulenzen aufgrund der Luftdurchmischung in der Erdatmosphäre [7]. Diese Turbulenzen können zwar durch verschiedene Maßnahmen heraus

gerechnet werden, erschweren oder verhindern aber die Detektion der Millisekunden-Ereignisse. Des weiteren wird das Licht in Horizontnähe durch die Atmosphäre aufgebrochen und der Mond erscheint rötlich. Ein zusätzlicher optischer Effekt ist die Vergrößerung von Himmelsobjekten in Horizontnähe.

Dies alles trägt zur Verfälschung der Beobachtungsergebnisse bei, kann aber umgangen werden, wenn man den störenden Einfluss der Atmosphäre minimiert, indem man aus dem Erdorbit beobachtet, wie anhand der Atmosphärendichte in Abbildung 2 erkennbar ist. Mit einer Konstellation aus mehreren Satelliten lässt sich so eine 24-Stunden Observation realisieren.



Abbildung 2: Dichte und Druck der Atmosphäre über Höhe h, Quelle: [8]

#### 2.3 Anforderungen an einen orbitalen Sensor

Die Anforderungen an einen orbitalen Sensor ergeben sich aus den Eigenschaften der zu beobachtenden Phänomene. Im folgenden wird auf einige Punkte näher eingegangen.

#### 2.3.1 Konstellation, Orbit und Sichtfeld

Der Sensor soll im niederen Erdorbit (LEO) in einer Höhe von 500 Km bis 800 Km fliegen, da hier der Einfluss der Erdatmosphäre weitestgehend eliminiert ist. Die Position im LEO ist einer im Geostationären Erdorbit (GEO) vorzuziehen. Einer der Hauptgründe dafür ist der Kostenfaktor: global gesehen, gibt es mehr Anbieter für den Transport in den LEO, als in den GEO, was sich positiv auf die Startkosten und die Startmöglichkeiten auswirkt. Des weiteren ist für den GEO mit einer höheren Komplexität des Satellitensystems zu rechnen, was die Gesamtkosten zusätzlich erhöht.

Da ein Satellit bei einer Umlaufzeit von 90 Minuten maximal 1/3 der Zeit im Erdschatten fliegt,

ist die Voraussetzung für eine ununterbrochene Beobachtung eine Walker-Konstellation aus zwei Satelliten in einer Ebene mit einem Abstand von einer halben Umrundung. Die Inklination des Orbits wird durch die Lage der Bodenstation diktiert, welche für deutsche Breiten mindestens 52° betragen muss. Alternativ ist eine Polare Umlaufbahn anzustreben, die es ermöglicht, in Kooperation mit einer polaren Bodenstation mehr Kontaktzeiten sicherzustellen.

Im Orbit soll der Sensor bei Sichtkontakt stets auf den Mond ausgerichtet sein und ihn immer komplett abbilden.

#### 2.3.2 Sensor-Eigenschaften

Die Anforderungen an den Sensor ergeben sich aus den Eigenschaften der TLP-Typen, die detektiert werden sollen. Dabei ist darauf zu achten, welche Information gewonnen werden soll. Zu gewinnende Informationen werden unterschieden in radiometrische, spektrale oder geometrische Information. In Tab. 1 sieht man, welche Information zur Detektion verwendet werden sollen. Die Tabelle basiert auf den erhobenen Daten von [4] und [9] und ist nur als erste Schätzung zu betrachten. Eine weitere Konkretisierung ist hier nötig. Generell muss festgestellt werden, dass die genaue Charakterisierung der TLP unzureichend ist, was aus ungenauen Beobachtungsergebnissen resultiert.

TLP Typ	Spektrale Eigenschaften	Geometrische Eigenschaften	Radiometrische Eigenschaften	Dauer
Aufhellung	380 nm – 780 nm	Mindestens 10 – 20 km <sup>2</sup>	Intensitätserhöhung bis zu 10 x normale Albedo	30 ms bis Minuten
Verdunklung	380 nm – 780 nm	Mindestens 5 km <sup>2</sup>	Intensitätsschwächung um bis zu 80 % [1]	Minuten bis Stunden
Rote Färbung	620 nm – 780 nm	Mindestens 5 km <sup>2</sup>	-	Minuten bis Stunden
Blaue Färbung	380 nm – 490 nm	Mindestens 5 km <sup>2</sup>	-	Minuten bis Stunden
Überdeckung	380 nm – 780 nm	Je nach Oberflächenmerk-mal, mindestens 1 km <sup>2</sup> .	-	Minuten bis Stunden

Tab. 1: Detektierbare Information zur Erkennung eines TLP Ereignisses, geordnet nach Typ

Das Problem das sich bei der Erkennung von Überdeckungen ergibt, ist die Forderung nach hoher Bodenauflösung, da hierzu die geometrische Information gewonnen werden muss. Die Erfahrung von Beobachtungen mit Teleskopen auf der Erde zeigt, dass dafür eine hohe Brennweite nötig ist [5]. Daraus wiederum resultiert ein kleines Sichtfeld, sodass davon Abstand zu nehmen ist.

Blaue und rote Färbung kann durch die Veränderungen im Spektrum detektiert werden. Bei Einsatz eines Spektrometers wird das Sichtfeld erheblich eingeschränkt aufgrund der erforderlichen Bodenauflösung. Hierbei ist eine Matrix-Sensor Lösung mit entsprechenden Filtern denkbar.

Verdunklung und Aufhellung wird über die Intensitätsänderung im sichtbaren Spektrum detektiert und soll mit einem Matrix-Sensor praktisch umgesetzt werden.

Durch die verschiedenen Mondphasen wird die Detektion erschwert. Das triff vor allem auf die Phasen zwischen Neu- Und Vollmond zu, da hier sowohl auf der hellen, als auch auf der dunklen Seite Beobachtungen möglich sein sollen. Wichtig hierbei ist, dass durch die geringe Intensität des reflektierten Mondlichts auf der Dunklen Seite (Erd-Albedo) als einziger Typ Aufhellung detektierbar ist. Daraus folgt die Anforderung, auf der Schattenseite nur TLP des Typs Aufhellung zu beobachten.

Auf der hellen Seite ist vorerst nur die Detektion von Aufhellung und Verdunklung anzustreben. Sollten die weiteren Forschungsergebnisse bezüglich der in Tab. 1 aufgeführten Daten eine Beobachtung von Farbänderungen bei geringer Erhöhung der Komplexität zulassen, so sind hierfür entsprechende Anforderungen aufzustellen. Ansonsten ist davon Abstand zu nehmen.

#### 2.3.3 Optik-Eigenschaften

Die Optik ist so zu wählen, dass eine Bodenauflösung mindestens oder höher der in Tab. 1 ausgewiesenen gewährleistet ist. Die Baugruppe sollte dabei möglichst Kompakt sein.

Durch die Weltraumbedingungen (Vakuum, erhöhte Strahlungsbelastung) sollten die Komponenten wie Linsen, Fassungen u.ä. nicht aus Materialien bestehen oder solche enthalten, welche durch die Weltraumumgebung beeinträchtigt werden.

#### 2.3.4 Datenprozessierung

Um die dynamischen Phänomene wissenschaftlich analysieren zu können sollen Videodaten mit einer Datenrate von mindestens 30 Bildern pro Sekunde über eine Dauer von 5 bis 10 Sekunden gespeichert werden. Zur Detektion von Aufhellungen mit Dauern im Millisekundenbereich, ist die Auswertung in Echtzeit an Bord notwendig.

Die Datenprozessierung ist mit Hilfe eines leistungsfähigen Rechners in FPGA-Bauweise oder durch bildverarbeitende Prozessoren zu realisieren.

### 2.3.5 Dimensionen, Masse und Energieverbrauch

Die Dimensionen des Sensors sollen derart gestaltet sein, dass er als Primärnutzlast in einen Nano- oder Microsatelliten bis zu 100 kg passt. Aus diesem Grund sollte die Masse 10% bis 20 % der Gesamtmasse des Satelliten nicht überschreiten.

Der Energieverbrauch sollte entsprechend des Satellitenbusses 50 W nicht überschreiten.

Diese Anforderungen stellen erste Schätzungen dar, und sind Gegenstand weiterer Untersuchungen.

### 2.4 Vorschlag für einen orbitalen Sensor

Aus den vorangegangenen Ausführen lassen sich nun leicht ein paar Eckpunkte für einen Sensor definieren und bestimmen. Für die folgenden Berechnungen diente [6] als Grundlage. Die definierten Parameter sind als Beispiel gewählt, um zu zeigen, wie diese sich auf die Eigenschaften des Sensors auswirken.

Die Satelliten befinden sich in einem 800 km Kreisorbit um die Erde und die Nutzlast ist bei Sichtkontakt auf den Mond ausgerichtet. In dieser Höhe ist der Einfluss der Atmosphäre

minimal.

Die Umlaufzeit errechnet sich nach:

$$t_{umlauf} = 1.658669 \cdot 10^{-4} \cdot (d_{erde} + h_{orbit})^{1.5}$$
 eq. 1

Sie beträgt demnach 100.87 min.

Die mittlere Entfernung zwischen Erde und Mond beträgt 384400 Km, der Durchmesser des Mondes beträgt 3476 Km. Mit diesen Angaben lässt sich der Winkel unter dem Radius des Mondes aus der Ferne berechnen.

$$\rho = \arcsin\left(\frac{d_{mond}}{(d_{mond} + r_{erde-mond} - h_{orbit})}\right) \qquad \text{eq. 2}$$

Für die weitere Berechnung wird eine Bodenpixelbreite von  $Y_{max} = 1$  km gefordert. Das Sichtfeld errechnet sich so über:

3

$$IFOV = \arctan\left(\frac{Y_{max}}{R_s}\right) \qquad \text{eq.}$$

Wobei R<sub>s</sub>, die Schrägentfernung, in diesem Fall die Entfernung vom Sensor zur Mondoberfläche ist. Somit wird die Gesamtpixelzahl in einer Zeile der Matrix errechnet durch:

$$Z_c = \frac{\rho}{IFOV}$$
 eq. 4

Sie beträgt für diesen Fall  $Z_{\rm C} = 3476$  Pixel, unter der Annahme eines quadratischen Sensors (12 Megapixel). Im Falle einer Bodenpixelbreite von  $Y_{\rm max} = 2$  km, würden 1738 Pixel pro Zeile benötigt. Das entspricht einem 3 Megapixel-Chip.

Die Brennweite der Optik errechnet sich über:

$$l_{fokus} = \frac{d_{pixel}}{IFOV}$$
 eq. 5

Bei einer Pixelbreite von  $d_{pixel} = 220$  nm, was modernen CMOS-Sensoren entspricht, und einer Bodenpixelbreite von  $Y_{max} = 1$  km, wird eine Brennweite von  $l_{fokus} = 84,39$  cm. Beträgt  $Y_{max} = 2$  km, so halbiert sich die Brennweite auf  $l_{fokus} = 42,2$  cm. Daraus lässt sich die Öffnungsblende berechnen:

$$d_{apertur} = \frac{2.44 \cdot \lambda \cdot l_{fokus} \cdot Q}{d_{pixel}} \quad \text{eq. 6}$$

Die Öffnungsblende für eine Bodenpixelbreite von  $Y_{max} = 1$  km beträgt  $d_{apertur} = 51,48$  cm, und verdoppelt sich bei  $Y_{max} = 2$  km. Somit folg für die Blendenzahl

$$F = \frac{l_{fokus}}{d_{apertur}} \quad \text{eq. 7}$$

Die Blendenzahl für beide Beispiele beträgt F = 1,6

Die Berechnung zeigt, dass der Aufwand bezüglich Optik, Sensorelektronik und Datenverarbeitung höher wird, je größer die Bodenauflösung gewählt wird, da die Bildverarbeitung in Echtzeit ablaufen muss, wie oben gefordert. Möchte man das umgehen, ergeben sich mehrere Varianten.

Zum einen könnte der Satellit mit zwei optischen Sensoren ausgestattet sein, wobei einer mit höherer Bodenpixelauflösung arbeitet und nur benutzt wird, wenn ein Ereignis detektiert wird. Problematisch hierbei sind die mitunter schnellen Reaktionszeiten, die erforderlich wären, um den höher auflösenden Sensor in Position zu bringen. Das Ereignis muss dabei allerdings von entsprechen hoher Intensität, bzw. Großflächigkeit sein, da das primäre Instrument eine geringere Auflösung besitzt.

Denkbar ist auch ein Satellit mit einem hochauflösenden Instrument, welches allerdings durch entsprechende Auswertungsalgorithmen nur bestimmte Regionen mit hoher Auflösung überwacht, von denen bekannt ist, dass sie aktiv sind. Der Rest der Mondoberfläche würde mit verringerter Auflösung, etwa durch Makropixelbildung überwacht.

Eine weitere Variante wäre, die geringere Bodenpixelauflösung in Kauf zu nehmen und dafür nur TLP des Typs "Aufhellung" zu detektieren, da zu erwarten ist, dass Intensitätserhöhungen über eine größere Fläche leichter wahrgenommen werden, besonders, wenn es sich um kurzzeitige, helle Ereignisse (Blitze) handelt.

### 3 Literaturverzeichnis

- NIKOLAI A. KOZYREV, Observation of a Volcanic Process on the Moon, Sky and Telescope February 1959, Sky publishing, Februar 1959, S. 184-186
- J. HEDLEY ROBINSON, Some Possible Causes of TLP, Sky and Telescope March 1991, Sky publishing, März 1991, S. 268
- [3] WINIFRED S. CAMERON, Lunar Transient Phenomena, Sky and Telescope March 1991, Sky Publishing, März 1991, S. 265-268
- WINIFRED S. CAMERON, Analyses of Lunar Transient Phenomena (LTP) Observations from 557-1994, National Space Science Data Center, 1994
- [5] GERALD NORTH, Den Mond Beobachten, Spektrum Akademischer Verlag GmbH, 2003
- [6] WILEY J. LARSON, JAMES R. WERTZ, Space Mission Analysis and Design, Third Edition, Microcosm Inc. 2005
- [7] JOHN M. WALLACE, PETER. V. HOBBS, Atmospheric Science, Academic Press, 2006
- [8] WIKIPEDIA, Erdatmosphäre, http://de.wikipedia.org/wiki/Erdatmosph%C3%A4re
- [9] NASA TECHNICAL REPORT R-277, Chronological Catalogue of Reported Lunar Events, Juli 1968, http://www.mufor.org/tlp/lunar.html
- [10] PHILLIP BALL, NEWS@NATURE.COM, Moon too Static for Astronauts?, Nature Publishing Group, 2. Februar 2007, <u>http://news.nature.com//news/2007/070129/070129-16.htm</u>
- [11] MARCUS BECKER, SPIEGEL ONLINE, Aktiver Erdtrabant Gas-Blähungen aud dem Mond, 9. November 2006, <u>http://www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/0,1518,447507,00.html</u>
- [12] ADOLF VOIGT, WILFRIED TOST, Der digitale Berliner Mondatlas in 108 fotografischen Blättern, Wilhelm Förster Sternwarte Berlin, Gruppe Berliner Mondbeobachter

# **AUTORENVERZEICHNIS**

ABEBE, B.: Siehe HELBIG, M., BUCHWITZ, M., GLOAGUEN, R. & ABEBE, B.: Fault	
generation and development in the oblique-rifting Reykjanes Peninsula system	
resolved by a DEM analysis approach.	559
AKCA, D.: Siehe BALTSAVIAS, E., EISENBEISS, H., AKCA, D., WASER, L.T., KÜCHLER, M.,	
GINZLER, C. & THEE, P.: Modeling fractional shrub/tree cover and multi-temporal	
changes using high-resolution digital surface models and CIR-aerial images	287
AKCA, D.: Siehe GRUEN, A. & AKCA, D.: Mobile Photogrammetry.	
441	
ANDERMANN, C., GLOAGUEN, R. & STADLER, S.: Quantitative erosion estimation in the	
rugged topography of the high Himalayas. Integrated approach.	547
ANNEN, A., NEBIKER, S. & OESCH, D.: Einsatz von Mikro- und Minidrohnen für	
Fernerkundungsaufgaben in der agrochemischen Forschung und Entwicklung	399
ARAÚJO, E.: Siehe BLASCHKE, T., HOFMANN, P., GEORG, I., SCHÖPFER, E., TIEDE, D.,	
LANG, S., MÖLLER, M., ARAÚJO, E. & KUX, H.: Möglichkeiten und Grenzen der	
Fernerkundung für das Monitoring und Safeguarding informeller Siedlungen:	
Eine Synthese.	361
ARTUSO, R.: Praktische Methoden zur Verifikation von hochgenauen landesweiten	
Laser Höhenmodellen.	271
BÄHR, HP.: Siehe WEIDNER, U. & BÄHR, HP.: Vergleich von pixel- und	
segmentbasierter Klassifizierung am Beispiel des Kaiserstuhls.	315
BALTSAVIAS, E., EISENBEISS, H., AKCA, D., WASER, L.T., KÜCHLER, M., GINZLER, C. &	
THEE, P.: Modeling fractional shrub/tree cover and multi-temporal changes using	
high-resolution digital surface models and CIR-aerial images.	287
BALTSAVIAS, E.: Siehe SCHROTTER, G., SAUERBIER, M., EISENBEISS, H., BALTSAVIAS, E.,	
KORNER, T., LEHRE, M. & PIENDL, T.: EyeLearn: E-Learning support for	
photogrammetry and remote sensing lectures.	59
BANGE, L., PEIPE, J. & PRZYBILLA, HJ.: 3D-Dokumentation des Essener Domschatzes	433
BAUER, T. & SUCHENWIRTH, L.: Objektbasierte Bildinterpretation: kann der Mensch	
ersetzt werden? Überlegungen zur Automatisierung der visuellen Interpretation	
am Beispiel der Überwachung des Koka-Anbaus in Kolumbien.	307
BAUMGARTNER, M., ZAPPA, M., HONG, S. Z., GURTZ, J. & SCHÄDLER, B.: Verbesserung	
der Hochwasservorhersage des Yangtze / Drei-Schluchten-Gebiet (China)	353
BELKAÏD, M.: Siehe SAUERBIER, M., FUX, P., LINDSTAEDT, M., KERSTEN, T.,	
PETERHANS, J. & BELKAÏD, M.: Dokumentation und 3D-Modellierung der	
Petroglyphen von Chichictara (Peru) mittels terrestrischem Laserscanning und	
Photogrammetrie.	425
BEYERLE, G.: Siehe HELM, A., WETZEL, HU., MICHAJLJOW, W., BEYERLE, G.,	
REIGBER, CH. & ROTHACHER, M.: Natural Hazard Monitoring with Reflected	
GPS Signals at Merzbacher Glacier Lake.	505
BLASCHKE, T., HOFMANN, P., GEORG, I., SCHÖPFER, E., TIEDE, D., LANG, S., MÖLLER, M.,	
ARAÚJO, E. & KUX, H.: Möglichkeiten und Grenzen der Fernerkundung für das	
Monitoring und Safeguarding informeller Siedlungen: Eine Synthese.	361
BOOCHS, F.: Siehe CRUZ, C. & BOOCHS, F.: Reconstruction of Architectural Objects	
from 3D scanner survey.	95
BÖRNER, A., HIRSCHMÜLLER, H., NEIDHARDT, M., NITZ, M., SCHEIBE, K.,	
WOHLFEIL, J. & ZUEV, S.: Ableitung photogrammetrischer Produkte mit der	
MFC-Kamera	667
BOVET, S.: Siehe BÜHLER, Y., KNEUBÜHLER, M., BOVET, S. & KELLENBERGER, T.:	
Anwendung von ADS40 Daten im Agrarbereich.	381
BOVET, S.: Siehe SIMMEN, JL. & BOVET, S.: Landesweites Orthophoto dank der	
Digitalkamera ADS40.	347
BRIESE, C., DONEUS, M., PFEIFER, N. & MELZER, T.: Verbesserte DGM-Erstellung	
mittels Full-Waveform Airborne Laserscanning.	215

BRIESE, C.: Siehe OTEPKA, J., BRIESE, C. & PFEIFER, N.: Erweiterung der Linearen Prädiktion – Berücksichtigung zusätzlicher Linien-, Flächennormalen- und Krümmungsbeobachtungen	223
BRUNN, A.: Siehe DRAUSCHKE, M., BRUNN, A., KULSCHEWSKI, K. & FÖRSTNER, W.: Automatic Dodging of Aerial Images.	173
BUCHER, T.: Die DPP-Methode: ein einfacher empirischer Ansatz zur Korrektur atmosphärischer Effekte in HRSC-AX Scannerdaten.	181
BUCHWITZ, M.: Siehe HELBIG, M., BUCHWITZ, M., GLOAGUEN, R. & ABEBE, B.: Fault generation and development in the oblique-rifting Reykjanes Peninsula system resolved by a DEM analysis approach.	. 559
BÜHLER, Y., KNEUBÜHLER, M., BOVET, S. & KELLENBERGER, T.: Anwendung von ADS40 Daten im Agrarbereich.	381
CHRISTEN, M.: Siehe NEBIKER, S., CHRISTEN, M., EUGSTER, H., FLÜCKIGER, K., STIERLI, Integration von mobilen Geosensoren in kollaborative virtuelle Globen.	C.: 189
CRAWFORD, M.: Siehe LU PING, GLOAGUEN, R., GOVERS, G. & CRAWFORD, M.: Calculating Channel Concavity from ASTER DEM: Case Study, Southeastern	553
CRUZ, C. & BOOCHS, F.: Reconstruction of Architectural Objects from 3D scanner survey	95
DONEUS, M.: Siehe BRIESE, C., DONEUS, M., PFEIFER, N. & MELZER, T.: Verbesserte DGM-Erstellung mittels Full-Waveform Airborne Laserscanning.	215
DÖRSTEL, C.: Siehe REULKE, R., DÖRSTEL, C. & SCHWEBEL, R.: Die Norm E DIN 18740-4 – Anforderungen an digitale Luftbildkameras und an	
digitale Lutibilder. DRAUSCHKE, M., BRUNN, A., KULSCHEWSKI, K. & FÖRSTNER, W.: Automatic Dodging of Acial Images	281
DRAUSCHKE, M.: Siehe WENZEL, S., DRAUSCHKE, M. & FÖRSTNER, W.: Detektion wiederholter und symmetrischer Strukturen in Fassadenbildern.	173
EDRICH, M.: Siehe SAUR, G., EDRICH, M., HEINZE, N. & KRÜGER, W.: Video-like MiSAR image sequence processing	111
EISENBEISS, H.: Siehe BALTSAVIAS, E., EISENBEISS, H., AKCA, D., WASER, L.T., KÜCHLER, M., GINZLER, C. & THEE, P.: Modeling fractional shrub/tree cover and multi-temporal changes using high-resolution digital surface models and	
CIR-aerial images. EISENBEISS, H.: Siehe SCHROTTER, G., SAUERBIER, M., EISENBEISS, H., BALTSAVIAS, E., KORNER, T., LEHRE, M. & PIENDL, T.: EyeLearn: E-Learning support for	287
EUGSTER, H.: Georegistrierung mittels Minidrohnen erfasster Videosequenzen –	. 59 637
EUGSTER, H.: Siehe NEBIKER, S., CHRISTEN, M., EUGSTER, H., FLÜCKIGER, K., STIERLI, C.: Integration von mobilen Geosensoren in kollaborative virtuelle Globen.	189
FLÜCKIGER, K.: Siehe NEBIKER, S., CHRISTEN, M., EUGSTER, H., FLÜCKIGER, K., STIERLI, C.: Integration von mobilen Geosensoren in kollaborative virtuelle Globen	189
FÖRSTNER, W.: Siehe DRAUSCHKE, M., BRUNN, A., KULSCHEWSKI, K. & FÖRSTNER, W.: Automatic Dodging of Aerial Images.	173
FÖRSTNER, W.: Siehe WENZEL, S., DRAUSCHKE, M. & FÖRSTNER, W.: Detektion wiederholter und symmetrischer Strukturen in Fassadenbildern FRANZEN, M.: Siehe RIES, C., FRANZEN, M., STEINNOCHER, K. & KRESSLER, F.: Der	119
Österreichische Ansatz für Aufbau und Aktualisierung des Objektbereichs Bodenbedeckung im Digitalen Landschaftsmodell.	103
Calibration System for Human Surface Measurement and Motion Capture.	417

FUX, P.: Siehe SAUERBIER, M., FUX, P., LINDSTAEDT, M., KERSTEN, T., PETERHANS, J. & BELKAÏD, M.: Dokumentation und 3D-Modellierung der Petroglyphen von Chichietara (Paru) mittels terrestrischem Laserscapping und Photogrammetrie	425
GÄHLER, M. & SCHIEWE, J.: Biotoptypenmonitoring - Identifikation von Veränderungen mittels höchst auflösender digitaler Fernerkundungsdaten.	155
Garvaix, F.: Siehe GASSER, J. & GERVAIX, F.: Image pre-processing and vector extraction of paths and hicking trails.	135
GASSER, J. & GERVAIX, F.: Image pre-processing and vector extraction of paths and bicking trails	135
GEHRKE, S.: Zur geometrischen und radiometrischen Modellierung der Mars-Oberfläche aus HRSC-Daten.	683
Georg, I.: Siehe BLASCHKE, T., HOFMANN, P., GEORG, I., SCHÖPFER, E., TIEDE, D., LANG, S., MÖLLER, M., ARAÚJO, E. & KUX, H.: Möglichkeiten und Grenzen der Fernerkundung für das Monitoring und Safeguarding informeller Siedlungen: Eine Synthese	361
GIESE, B.: Siehe Scholten, F., WÄHLISCH, M., GIESE, B., GWINNER, K., ROATSCH, T., MATZ, KD., HOFFMEISTER, A., OBERST, J. & JAUMANN, R.: Photogrammetrische	075
Anwendungen in der Planetenforschung. GINZLER, C.: Siehe BALTSAVIAS, E., EISENBEISS, H., AKCA, D., WASER, L.T., KÜCHLER, M., GINZLER, C. & THEE, P.: Modeling fractional shrub/tree cover and multi-temporal changes using high-resolution digital surface models and	675
CIR-aerial images. GLOAGUEN, R.: Siehe ANDERMANN, C., GLOAGUEN, R. & STADLER, S.: Quantitative erosion estimation in the rugged topography of the high Himalayas. Integrated	287
approach. Gloaguen, R.: Siehe HAHN, C., WIJAYA, A. & GLOAGUEN, R.: Application of Support Vector Machine for Complex Land Cover Classification using Aster and Landsat Data.	547 149
GLOAGUEN, R.: Siehe HELBIG, M., BUCHWITZ, M., GLOAGUEN, R. & ABEBE, B.: Fault generation and development in the oblique-rifting Reykjanes Peninsula system	
resolved by a DEM analysis approach. GLOAGUEN, R.: Siehe KÄßNER, A., GLOAGUEN, R. & STANEK, K.: Remote Sensing analysis of recent tectonics: The Erzrebirge and the Erzertraben	559 529
GLOAGUEN, R.: Siehe LU PING, GLOAGUEN, R., GOVERS, G. & CRAWFORD, M.: Calculating Channel Concavity from ASTER DEM: Case Study, Southeastern	020
Tibet. Gloaguen, R.: Siehe PEISCHL, S., GLOAGUEN, R. & NIEMEYER, I.: Modelling of soil	553
moisture in agricultural areas using ENVISAT ASAR-data	375
Fernerkundung im Schulunterricht. GOVERS, G.: Siehe LU PING, GLOAGUEN, R., GOVERS, G. & CRAWFORD, M.: Calculating	41 J
Channel Concavity from ASTER DEM: Case Study, Southeastern Tibet GRENDUS, B.: Computerunterstütztes kollaboratives und kooperatives Lernen	553
in der Geoinformatik. GRENZDÖRFFER, G. & ZUEV, S.: Bestimmung des photogrammetrischen Genauigkeitspotentials des Online-Systems ANTAR zur luftgestützten	69
Verkehrsdatenerfassung. GRUBER, M. & SCHNEIDER, S.: UltraCamX, die neue digitale Luftbildkamera von	571
MICrosoft. GRUEN, A. & AKCA, D.: Mobile Photogrammetry. GRUEN, A., KOCAMAN, S. & WOLFF, K.: High Accuracy 3D Processing of Stereo	579 441
Satellite Images in Mountainous Areas. GRÜNKEMEIER, A. & STAIGER, R.: Instrumentenuntersuchung des Laserscanners	625
LMS Z420i von RIEGL.	493

GUDMUNDSSON, A.: Siehe MARTINIS, S., SCHARRER, K., MÜNZER, U., MAYER, C. &	
GUDMUNDSSON, A.: Influences of the 2004 jokulhlaup on ice dynamics of	
Skeidararjokull, Iceland, using Terra-ASTER imagery.	503
GURTZ, J.: Siehe BAUMGARTNER, M., ZAPPA, M., HONG, S. Z., GURTZ, J. &	
SCHADLER, B.: Verbesserung der Hochwasservornersage des Yangtze /	
Drei-Schluchten-Gebiet (China).	353
GWINNER, K.: Siehe SCHOLTEN, F., WAHLISCH, M., GIESE, B., GWINNER, K.,	
ROATSCH, I., MATZ, KD., HOFFMEISTER, A., OBERST, J. & JAUMANN, R.:	
Photogrammetrische Anwendungen in der Planetenforschung.	675
HAHN, C., WIJAYA, A. & GLOAGUEN, R.: Application of Support Vector Machine for	
Complex Land Cover Classification using Aster and Landsat Data.	149
HASTEDT, H., LUHMANN, T., PEIPE, J. & TECKLENBURG, W.: Uberlegungen zur	
Software-Zertifizierung in der Nahbereichsphotogrammetrie.	257
HEINZE, N.: Siehe SAUR, G., EDRICH, M., HEINZE, N. & KRÜGER, W.: Video-like MiSAR	
image sequence processing.	111
HELBIG, M., BUCHWITZ, M., GLOAGUEN, R. & ABEBE, B.: Fault generation and	
development in the oblique-rifting Reykjanes Peninsula system resolved by a	
DEM analysis approach.	559
HELM, A., WETZEL, HU., MICHAJLJOW, W., BEYERLE, G., REIGBER, CH. &	
ROTHACHER, M .: Natural Hazard Monitoring with Reflected GPS Signals at	
Merzbacher Glacier Lake.	505
HEROLD, M., SAMBALE, J., LINDNER, M., URBAN, M. & WEAVER, S.: Satellite based	
monitoring of the national forest resources in the pacific island state of Vanuatu.	391
HESE, S. & SCHMULLIUS, C.: Classification of Image Structure and Context for	
Mapping of Terrestrial Crude Oil Contaminations.	323
HIRSCHMUGL, M., WENINGER, B., RAGGAM, H. & SCHARDT, M.: Die Ableitung von	
Forstinventurparametern aus digitalen Luftbildkameradaten	127
HIRSCHMÜLLER H. Siehe BÖRNER A HIRSCHMÜLLER H NEIDHARDT M NITZ M	
SCHEIBE K WOHLEEIL J & ZUEV S Ableitung photogrammetrischer Produkte	
mit der MEC-Kamera	667
HOEEMANN C: Siehe WAGNER W. HOLLAUS M. STEINNOCHER K & HOEEMANN C:	007
Determination of urban land use based on airborne laser scanner and GIS data	2/1
HOEEMEISTER A $\cdot$ Siehe Scholten E Wähligen M Giese B Cwinner K	241
DOATCOLL T. MATZ K. D. HOEFMEISTER, A. OREDET, L. MAINNER, R.,	
Photogrammotrische Anwendungen in der Planetenferschung	675
HOLOGIAININEITSCHE ANWENDUNGEN IN DE GEODE L SCHÖDEED E	075
TUCHMANN, F., SICHE DLASCHKE, I., HUFMANN, F., GEURG, I., SCHUPFER, E.,	
Cronzen der Fernerkundung für des Menitering und Sefeguerding informeller	
Siedlungen Eine Sunthaan	004
Siedungen: Eine Synthese.	301
HOLLAUS, M.: Siene WAGNER, W., HOLLAUS, M., STEINNOCHER, K. & HOFFMANN, C.:	044
Determination of urban land use based on airborne laser scanner and GIS data.	241
HONG, S.Z.: SIENE BAUMGARTNER, M., ZAPPA, M., HONG, S. Z., GURTZ, J. &	
SCHADLER, B.: Verbesserung der Hochwasservornersage des Yangtze / Drei-	
Schluchten-Gebiet (China).	353
JACOBSEN, J.: Siehe SPRECKELS, V., SCHLIENKAMP, A. & JACOBSEN, J.:	
Modelldeformationen - Zur geometrischen Genauigkeit digitaler Luftbildkameras.	599
JACOBSEN, K.: Potential großformatiger digitaler Luftbildkameras.	. 589
JAUMANN, R.: Siehe SCHOLTEN, F., WAHLISCH, M., GIESE, B., GWINNER, K., ROATSCH, I	••
MATZ, KD., HOFFMEISTER, A., OBERST, J. & JAUMANN, R.: Photogrammetrische	
Anwendungen in der Planetenforschung.	675
KABNER, A., GLOAGUEN, R. & STANEK, K.: Remote Sensing analysis of recent tectonics:	
The Erzgebirge and the Egergraben.	529
KELLENBERGER, I.: Siehe BUHLER, Y., KNEUBÜHLER, M., BOVET, S. & KELLENBERGER, T	.:
Anwendung von ADS40 Daten im Agrarbereich.	381
KELLENBERGER, I.W.: Siehe SCHWANDER, A. & KELLENBERGER, T. W.: Objektorientierte	)
geomorphologische Klassifikation von IKONOS Daten im alpinen Raum	331

KERSTEN, T.: Siehe SAUERBIER, M., FUX, P., LINDSTAEDT, M., KERSTEN, T.,	
PETERHANS, J. & BELKAÏD, M.: Dokumentation und 3D-Modellierung der	
Petroglyphen von Chichictara (Peru) mittels terrestrischem Laserscanning	
und Photogrammetrie.	425
KNEUBÜHLER, M.: Siehe BÜHLER, Y., KNEUBÜHLER, M., BOVET, S. & KELLENBERGER, T.	:
Anwendung von ADS40 Daten im Agrarbereich.	381
KNUTH, R.: Siehe THIEL, CH., THIEL, C., KNUTH, R. & SCHMULLIUS, C.: Analyse von	
ASAR APP Zeitserien in Sibirien zur Optimierung der Waldkartierung – Eine	
Studie im Rahmen von GSE Forest Monitoring.	163
KOCAMAN, S.: Siehe GRUEN, A., KOCAMAN, S. & WOLFF, K.: High Accuracy 3D	
Processing of Stereo Satellite Images in Mountainous Areas.	625
KORNER, T. Siehe Schrotter, G., Sauerbier, M., Eisenbeiss, H., Baltsavias, F.,	
KORNER T LEHRE M & PIENDI T : Evel earn: E-l earning support for	
photogrammetry and remote sensing lectures	59
KRESSE W : Statusbericht zur Standardisierung für Photogrammetrie und	00
Fernerkundung	251
KDESSLED E Sigha PIES C EDANZEN M STEINNOCHED K & KDESSLED E DAR	201
Öctorroichische Ansatz für Aufbau und Aktualisierung des Obiekthereiche	
Bodonbodockung im Digitalon Landschaftsmodell	102
Koücen W.; Sieho Saun C. Eppicu M. Heinze N. & Koücen W.; Video liko	103
MICAD image acquires pressing	444
MISAR Image sequence processing.	111
KUCHLER, M.: SIENE BALTSAVIAS, E., EISENBEISS, H., AKCA, D., WASER, L.I.,	
KUCHLER, M., GINZLER, C. & THEE, P.: Modeling fractional shrub/tree cover	
and multi-temporal changes using high-resolution digital surface models and	~~~
CIR-aerial images.	287
KULSCHEWSKI, K.: Siehe DRAUSCHKE, M., BRUNN, A., KULSCHEWSKI, K. &	
FÖRSTNER, W.: Automatic Dodging of Aerial Images.	173
KUNZ, T., SCHMASSMANN, E. & O'SULLIVAN, W.: swisstopo's Topographic Geographic	
Information system TOPGIS.	207
KUX, H.: Siehe BLASCHKE, T., HOFMANN, P., GEORG, I., SCHÖPFER, E., TIEDE, D.,	
LANG, S., MÖLLER, M., ARAÚJO, E. & KUX, H.: Möglichkeiten und Grenzen der	
Fernerkundung für das Monitoring und Safeguarding informeller Siedlungen:	
Eine Synthese.	361
LADSTÄDTER, R.: Softwaregestützte Kompensation temperaturabhängiger	
Bilddeformationen für die Vexcel UltraCam.	609
LANG, S.: Siehe BLASCHKE, T., HOFMANN, P., GEORG, I., SCHÖPFER, E., TIEDE, D.,	
LANG, S., MÖLLER, M., ARAÚJO, E. & KUX, H.: Möglichkeiten und Grenzen der	
Fernerkundung für das Monitoring und Safeguarding informeller Siedlungen:	
Eine Synthese.	361
LARANJEIRO, L.: Siehe WICKI, P. & LARANJEIRO, L.: Photogrammetrische Erfassung	
von Fliess- und Staublawinen mit digitalen Amateur-Kameras.	659
LAUENROTH, G.: Operational aspects of digital aerial mapping cameras.	565
LEGAT, K.: Direkte Georeferenzierung von Luftbildern – Theorie und praktische	
Erfahrungen.	299
LEHRER, M. Siehe Schrotter, G. Sauerbier, M. Eisenbeiss, H. Baltsavias, F.	
KORNER T LEHRE M & PIENDI T : Evel earn: E-l earning support for	
photogrammetry and remote sensing lectures	59
LINDNER M. Siehe HEROLD M. SAMBALE J. LINDNER M. LIRBAN M. & WEAVER S.	00
Satellite based monitoring of the national forest resources in the pacific island	
state of Vanuatu	391
LINDSTAEDT M. Siehe SALIEDDIED M. FLIV P. LINDSTAEDT M. KEDSTEN T	001
PETERHANS I & RELATIO M · Dokumentation and 3D-Modellierung der	
Petrodynhan von Chichictara (Paru) mittele terrectrischem Laseressning	
und Destogrammetric	125
UNUTIOUS AND A LICENCE A LICENCE C & MADDU D D Change detection based	420
on the philot Easturan	1 1 1
	141

LU PING, GLOAGUEN, R., GOVERS, G. & CRAWFORD, M.: Calculating Channel Concavity from ASTER DEM: Case Study, Southeastern Tibet.	553
LUHMANN, T.: Siehe HASTEDT, H., LUHMANN, T., PEIPE, J. & TECKLENBURG, W.: Überlegungen zur Software-Zertifizierung in der Nahbereichsphotogrammetrie.	257
MADER, S.: Siehe VOHLAND, M. & MADER, S.: From HyMap Imagery to Spatially	
Distributed Vegetation Water Contents – A Comparison of Different	
Estimation Approaches Based on Canopy Reflectance Modelling.	407
MARPU, P.R.: Siehe NIEMEYER, I., LISTNER, C. & MARPU, P.R.: Change detection	
based on the object Features.	141
MARTINIS, S., SCHARRER, K., MÜNZER, U., MAYER, C. & GUDMUNDSSON, A.: Influences	
of the 2004 jökulhlaup on ice dynamics of Skeiðarárjökull, Iceland, using	
Ierra-ASIER imagery.	503
MAS, S.: Siehe REINHARDT, W. & MAS, S.: Erfahrungen beim Austausch von	<b>F</b> 4
e-Learning-Kursen auf europaischer Ebene.	51
MATTHES, L.: Stene THEILEN-WILLIGE, B. & MATTHES, L.: Remote Sensing and GIS	
Approach for the Detection of Areas Prone to Natural Hazards in Northern	E 9 7
MATZ K. D. Sidda Scholten E. Wählichen M. Giere P. Chainner K.	557
ROATSCH T MATZ K-D HOEMEISTER & OREDST I & JALMANN R.	
Photogrammetrische Anwendungen in der Planetenforschung	675
MAVED C · SIEHE MADTINIS S SCHADDED K MÜNZED II MAVED C &	015
GUDMUNDSSON A : Influences of the 2004 likelibleup on ice dynamics of	
Skeiðaráriökull leeland using Terra-ASTER imagery	503
MAVER H · Automatische Orientierung mit und ohne Messmarken – Das Mögliche	505
und das Linmödliche	457
MELZER T. Siehe BRIESE C. DONELIS M. PEELEER N & MELZER T. Verbesserte	407
DGM-Erstellung mittels Full-Waveform Airborne Laserscanning	215
MICHAILIOW, W.: Siehe HELM, A., WETZEL, HU., MICHAILIOW, W., BEYERLE, G.,	2.10
REIGBER, CH. & ROTHACHER, M.: Natural Hazard Monitoring with Reflected	
GPS Signals at Merzbacher Glacier Lake	505
MÖLLER, M.; Siehe BLASCHKE, T., HOFMANN, P., GEORG, J., SCHÖPFER, E., TIEDE, D.,	
LANG. S., MÖLLER, M., ARAÚJO, E. & KUX, H.: Möglichkeiten und Grenzen der	
Fernerkundung für das Monitoring und Safeguarding informeller Siedlungen:	
Eine Synthese.	361
MÜNZER, U.: SIEHE MARTINIS, S., SCHARRER, K., MÜNZER, U., MAYER, C. &	
GUDMUNDSSON, A.: Influences of the 2004 jökulhlaup on ice dynamics of	
Skeiðarárjökull, Iceland, using Terra-ASTER imagery.	503
NEBEL, K.: Siehe SCHMIDT, K., NEBEL, K., RATZKE, HP., SMIT-PHILIPP, H. &	
WEISENSEE, M.: Hochwassersimulation im flachen Gelände – sind unsere	
Geobasisdaten ausreichend?	233
NEBIKER, S., CHRISTEN, M., EUGSTER, H., FLÜCKIGER, K., STIERLI, C.: Integration	
von mobilen Geosensoren in kollaborative virtuelle Globen.	189
NEBIKER, S.: Siehe ANNEN, A., NEBIKER, S. & OESCH, D.: Einsatz von Mikro- und	
Minidrohnen für Fernerkundungsaufgaben in der agrochemischen Forschung	
und Entwicklung.	399
Neidhardt, M.: Siehe Börner, A., HIRSCHMÜLLER, H., NEIDHARDT, M., NITZ, M.,	
SCHEIBE, K., WOHLFEIL, J. & ZUEV, S.: Ableitung photogrammetrischer Produkte	
mit der MFC-Kamera.	667
NEIDHART, H.: Digitale Wärmebedarfskarte aus Laserscanning.	339
NIEMEYER, I., LISTNER, C. & MARPU, P.R.: Change detection based on the object	
Features.	141
NIEMEYER, I.: Siehe PEISCHL, S., GLOAGUEN, R. & NIEMEYER, I.: Modelling of soil	<b></b>
moisture in agricultural areas using ENVISAT ASAR-data.	375
NITZ, M.: SIENE BORNER, A., HIRSCHMULLER, H., NEIDHARDT, M., NITZ, M., SCHEIBE, K.,	
VVOHLFEIL, J. & ZUEV, S.: Ableitung photogrammetrischer Produkte mit der	007
IVIFU-Namera.	007

O'SULLIVAN, W.: Siehe KUNZ, T., SCHMASSMANN, E. & O'SULLIVAN, W.: swisstopo's Topographic Geographic Information system TOPGIS.	207
OBERST, J.: Siehe SCHOLTEN, F., WAHLISCH, M., GIESE, B., GWINNER, K., ROATSCH, T., MATZ, KD., HOFFMEISTER, A., OBERST, J. & JAUMANN, R.: Photogrammetrische Anwendungen in der Planetenforschung.	675
OESCH, D.: Šiehe ANNEN, A., NEBIKER, S. & OESCH, D.: Einsatz von Mikro- und Minidrohnen für Fernerkundungsaufgaben in der agrochemischen Forschung	300
OTEPKA, J., BRIESE, Č. & PFEIFER, N.: Erweiterung der Linearen Prädiktion – Berücksichtigung zusätzlicher Linien-, Flächennormalen- und	555
Krummungsbeobachtungen. PEIPE, J., RIEKE-ZAPP, D. & TECKLENBURG, W.: Genauigkeitsuntersuchung von	223
PEIPE, J.: Siehe BANGE, L., PEIPE, J. & PRZYBILLA, HJ.: 3D-Dokumentation des Essener Domschatzes.	433
PEIPE, J.: Siehe HASTEDT, H., LUHMANN, T., PEIPE, J. & TECKLENBURG, W.: Überlegungen zur Software-Zertifizierung in der Nahbereichsphotogrammetrie	257
PEISCHL, S., GLOAGUEN, R. & NIEMEYER, I.: Modelling of soil moisture in agricultural areas using ENVISAT ASAR-data.	375
PETER, W.: Siehe WIEDEMANN, A., PETER, W. & SCHMITS, M.: Möglichkeiten und Einschränkungen des kombinierten Einsatzes digitaler Luftbildkameras und	
Iuftgestützter Laserscanner. PETERHANS, J.: Siehe SAUERBIER, M., FUX, P., LINDSTAEDT, M., KERSTEN, T., PETERHANS, J. & BELKAÏD, M.: Dokumentation und 3D-Modellierung der Petroelurben von Chipitatora (Paru) mittels terrestrischem Laserscanning	617
und Photogrammetrie.	425
DGM-Erstellung mittels Full-Waveform Airborne Laserscanning.	215
PFEIFER, N.: Siehe OTEPKA, J., BRIESE, C. & PFEIFER, N.: Erweiterung der Linearen Prädiktion – Berücksichtigung zusätzlicher Linien-, Flächennormalen- und	222
PFEIFER, N.: Tradition und Fortschritt in der Photogrammetrie - Prof. Kraus 1974 bis 2006 am I.P.F. der TU Wien.	223
PIENDL, T.: Siehe SCHROTTER, G., SAUERBIER, M., EISENBEISS, H., BALTSAVIAS, E., KORNER, T., LEHRE, M. & PIENDL, T.: EyeLearn: E-Learning support for	50
PRZYBILLA, HJ.: Siehe BANGE, L., PEIPE, J. & PRZYBILLA, HJ.: 3D-Dokumentation des Essener Domschatzes	133
PUTZE, T.: Mehrmedienphotogrammetrie an schwer zugänglichen, komplexen Körpern.	475
RAGGAM, H.: Siehe HIRSCHMUGL, M., WENINGER, B., RAGGAM, H. & SCHARDT, M.: Die Ableitung von Forstinventurparametern aus digitalen Luftbildkameradaten	127
RATZKE, HP.: Siehe SCHMIDT, K., NEBEL, K., RATZKE, HP., SMIT-PHILIPP, H. & WEISENSEE, M.: Hochwassersimulation im flachen Gelände – sind unsere Geobasisdaten ausreichend?	233
REIGBER, CH.: Siehe HELM, A., WETZEL, HU., MICHAJLJOW, W., BEYERLE, G., REIGBER, CH. & ROTHACHER, M.: Natural Hazard Monitoring with Reflected	
GPS Signals at Merzbacher Glacier Lake. REINHARDT, W. & MÄS, S.: Erfahrungen beim Austausch von e-Learning-Kursen auf	505
REMONDINO, F.: Image-based detailed 3D geometric reconstruction of heritage objects.	483
an digitale Luftbildkameras und an digitale Luftbilder.	281
REUSCHENBACH; M.: Neue Wege der Fernerkundung im Geographieunterricht RIEKE-ZAPP. D.: Siehe PEIPE, J., RIEKE-ZAPP. D. & TECKLENBURG. W.:	35
Genauigkeitsuntersuchung von Kameras mit Foveon-Farbsensoren.	453

RIES, C., FRANZEN, M., STEINNOCHER, K. & KRESSLER, F.: Der Österreichische Ansatz für Aufbau und Aktualisierung des Objektbereichs Bodenbedeckung im Digitalen Landschaftsmodell.	103
ROATSCH, T.: Siehe Scholten, F., WÄHLISCH, M., GIESE, B., GWINNER, K., ROATSCH, T MATZ, KD., HOFFMEISTER, A., OBERST, J. & JAUMANN, R.: Photogrammetrische	.,
ROTHACHER, M.: Siehe HELM, A., WETZEL, HU., MICHAJLJOW, W., BEYERLE, G., REIGBER, CH. & ROTHACHER, M.: Natural Hazard Monitoring with Reflected GPS	675
Signals at Merzbacher Glacier Lake. SAMBALE, J.: Siehe HEROLD, M., SAMBALE, J., LINDNER, M., URBAN, M. & WEAVER, S.: Satellite based monitoring of the national forest resources in the pacific island	505
state of Vanuatu. SAUERBIER, M., FUX, P., LINDSTAEDT, M., KERSTEN, T., PETERHANS, J. & BELKAÏD, M.: Dokumentation und 3D-Modellierung der Petroglyphen von Chichictara (Peru)	391
mittels terrestrischem Laserscanning und Photogrammetrie	425
photogrammetry and remote sensing lectures. SAUR, G., EDRICH, M., HEINZE, N. & KRÜGER, W.: Video-like MiSAR image sequence	. 59
SCHÄDLER, B.: Siehe BAUMGARTNER, M., ZAPPA, M., HONG, S. Z., GURTZ, J. & SCHÄDLER, B.: Verbesserung der Hochwasservorhersage des Yangtze / Drei-	
Schluchten-Gebiet (China). SCHÄFER, D.: Skalierbarer Einsatz von Geographischen Informationssystemen (GIS) in Schulen.	353 . 79
SCHARDT, M.: Siehe HIRSCHMUGL, M., WENINGER, B., RAGGAM, H. & SCHARDT, M.: Die Ableitung von Forstinventurparametern aus digitalen Luftbildkameradaten	9 127
GUDMUNDSSON, A.: Influences of the 2004 jokulhlaup on ice dynamics of Skeiðarárjökull, Iceland, using Terra-ASTER imagery.	503
SCHEIBE, K., WOHLFEIL, J. & ZUEV, S.: Ableitung photogrammetrischer Produkte mit der MFC-Kamera.	667
SCHIEWE, J.: Konzeption für eine objektspezifische und fuzzy logic Veränderungsanalyse.	87
von Veränderungen mittels höchst auflösender digitaler Fernerkundungsdaten. SCHLIENKAMP, A.: Siehe SPRECKELS, V., SCHLIENKAMP, A. & JACOBSEN, J.:	155
Modelldeformationen - Zur geometrischen Genauigkeit digitaler Luftbildkameras. SCHMASSMANN, E.: Siehe KUNZ, T., SCHMASSMANN, E. & O'SULLIVAN, W.: swisstopo's	599
Topographic Geographic Information system TOPGIS SCHMIDT, K., NEBEL, K., RATZKE, HP., SMIT-PHILIPP, H. & WEISENSEE, M.: Hochwassersimulation im flachen Gelände – sind unsere Geobasisdaten	207
ausreichend?	233
Einschrankungen des komplinierten Einsatzes digitaler Luttbildkameras und luftgestützter Laserscanner.	617
and Context for Mapping of Terrestrial Crude Oil Contaminations	323
von ASAR APP Zeitserien in Sibirien zur Optimierung der Waldkartierung – Eine Studie im Rahmen von GSE Forest Monitoring SCHNEIDER, D.: Kombinierte Bündelblockausgleichung mit Varianz-	163
Komponentenschätzung bei der Fusion terrestrischer Laserscannerdaten, Panorama- und zentralperspektivischer Bilddaten.	465

SCHNEIDER, S.: Siehe GRUBER, M. & SCHNEIDER, S.: UltraCamX, die neue digitale	
Luftbildkamera von Microsoft.	579
SCHOLTEN, F., WÄHLISCH, M., GIESE, B., GWINNER, K., ROATSCH, T., MATZ, KD.,	
HOFFMEISTER, A., OBERST, J. & JAUMANN, R.: Photogrammetrische Anwendungen	า
in der Planetenforschung.	675
SCHÖPFER, E.: Siehe BLASCHKE, T., HOFMANN, P., GEORG, I., SCHÖPFER, E.,	
TIEDE, D., LANG, S., MÖLLER, M., ARAÚJO, E. & KUX, H.: Möglichkeiten und	
Grenzen der Fernerkundung für das Monitoring und Safeguarding informeller	
Significant of the Synthese	361
SCHPOTTER G & FLIA P : Design of a Multi-Camera Orientation and Calibration	501
States for Human Surface Macaumant and Mation Conture	117
System for Human Sunace Measurement, and Motion Capture.	417
SCHROTTER, G., SAUERBIER, M., EISENBEISS, H., BALTSAVIAS, E., KORNER, T.,	
LEHRE, M. & PIENDL, I.: EyeLearn: E-Learning support for photogrammetry	
and remote sensing lectures.	59
SCHROTTER, G.: Siehe WEHRLE, A. & SCHROTTER, G.: Integration von Geodatensätzen	
in Google Earth: Erarbeitung eines unabhängigen Informationssystems.	199
SCHWANDER, A. & KELLENBERGER, T. W.: Objektorientierte geomorphologische	
Klassifikation von IKONOS Daten im alpinen Raum.	331
SCHWEBEL, R.: Siehe REULKE, R., DÖRSTEL, C. & SCHWEBEL, R.: Die Norm E	
DIN 18740-4 – Anforderungen an digitale Luftbildkameras und an digitale	
l uftbilder 2	281
SIMMEN JL. & BOVET, S.: Landesweites Orthophoto dank der Digitalkamera ADS40	347
SMIT-PHILIPP H Siehe Schmidt K Nebel K Ratzke H -P. SMIT-PHILIPP H &	• · ·
WEISENSEE M : Hochwassersimulation im flachen Gelände – sind unsere	
Geobasisdaten ausreichend?	223
Speckers V Schrenkand & & Lacopsen L: Modelldeformationen - Zur	200
geometrischen Conquigkeit digitaler Luftbildkomeres	500
STADLED S Sido ANDERMANN C. CLOACUEN D & STADLED S : Quantitativa	599
orableR, S., Siene Andermann, C., OLOAGUEN, R. & STADLER, S., Quantitative	
erosion estimation in the rugged topography of the high himalayas.	E 4 7
	547
STAIGER, R.: Siene GRUNKEMELER, A. & STAIGER, R.: Instrumentenuntersuchung des	
Laserscanners LMS Z420i von RIEGL	493
STANEK, H.: Qualitatsmanagement Laser Scanning – Struktur, Erfassung und	
Umsetzung.	263
STANEK, K.: Siehe KÄßNER, A., GLOAGUEN, R. & STANEK, K.: Remote Sensing	
analysis of recent tectonics: The Erzgebirge and the Egergraben.	529
STEINNOCHER, K.: Siehe RIES, C., FRANZEN, M., STEINNOCHER, K. & KRESSLER, F.: Der	
Österreichische Ansatz für Aufbau und Aktualisierung des Objektbereichs	
Bodenbedeckung im Digitalen Landschaftsmodell.	103
STEINNOCHER, K.: Siehe WAGNER, W., HOLLAUS, M., STEINNOCHER, K. & HOFFMANN, C.:	
Determination of urban land use based on airborne laser scanner and GIS data.	241
STIERLI, C.: Siehe NEBIKER, S., CHRISTEN, M., EUGSTER, H., FLÜCKIGER, K., STIERLI, C.:	
Integration von mobilen Geosensoren in kollaborative virtuelle Globen.	189
SUCHENWIRTH, L.: Siehe BAUER, T. & SUCHENWIRTH, L.: Objektbasierte	
Bildinterpretation: kann der Mensch ersetzt werden? Überlegungen zur	
Automatisiarung der visuellen Interpretation am Beispiel der Überwachung des	
Koka-Anbaus in Kolumbian	307
TEORIENDUDO W Sicho Hastert H. LULIMANNI T. DEIDE 1.8 TEORIENDUDO W -	507
Überlegungen zur Seftwere Zertifizierung in der Nebbereichenbetegrammetrie	257
	257
TECKLENBURG, W.: Siene PEIPE, J., RIEKE-ZAPP, D. & TECKLENBURG, W.:	450
Genauigkensumersuchung von Kameras mit Foveon-Farbsensoren.	403
THEE, P.: SIENE BALTSAVIAS, E., EISENBEISS, H., AKCA, D., WASER, L. I., KUCHLER, M.,	
GINZLER, C. & THEE, P.: Modeling fractional shrub/tree cover and multi-temporal	
changes using high-resolution digital surface models and CIR-aerial images	287
THEILEN-WILLIGE, B. & MATTHES, L.: Remote Sensing and GIS Approach for the	
Detection of Areas Prone to Natural Hazards in Northern Yucatan, Mexico.	537

THEILEN-WILLIGE, B.: GIS Integrated Geologic and Tectonic Evaluations of Remote Sensing Data from Southwest-Germany and Northwest-Switzerland.	517
ASAR APP Zeitserien in Sibirien zur Optimierung der Waldkartierung – Eine	162
THIEL, CH., THIEL, C., KNUTH, R. & SCHMULLIUS, C.: Analyse von ASAR APP Zeitserien in Sibirien zur Optimierung der Waldkartierung – Eine Studie im Rahmen	103
von GSE Forest Monitoring.	163
THIERFELDT, F.: Siehe VOß, K., GOETZKE, R. & THIERFELDT, F.: Integration von	
Fernerkundung im Schulunterricht.	41
TIEDE, D.: Siehe BLASCHKE, T., HOFMANN, P., GEORG, I., SCHÖPFER, E., TIEDE, D.,	
LANG, S., MÖLLER, M., ARAÚJO, E. & KUX, H.: Möglichkeiten und Grenzen der	
Fernerkundung für das Monitoring und Safeguarding informeller Siedlungen:	~~ 4
Line Synthese.	361
URBAN, M.: SIENE HEROLD, M., SAMBALE, J., LINDNER, M., URBAN, M. & WEAVER, S.:	
Satellite based monitoring of the national forest resources in the pacific Island	201
State of Vallualu.	291
and practical experiences with Heliman System <sup>®</sup>	649
VOHLAND M & MADER S : From HyMan Imagery to Spatially Distributed Vegetation	045
Water Contents – A Comparison of Different Estimation Approaches Based on	
Canopy Reflectance Modelling.	407
VOB, K., GOETZKE, R. & THIERFELDT, F.: Integration von Fernerkundung im	
Schulunterricht.	41
WAGNER, W., HOLLAUS, M., STEINNOCHER, K. & HOFFMANN, C.: Determination of urban	
land use based on airborne laser scanner and GIS data.	241
WÄHLISCH, M.: Siehe SCHOLTEN, F., WÄHLISCH, M., GIESE, B., GWINNER, K.,	
ROATSCH, T., MATZ, KD., HOFFMEISTER, A., OBERST, J. & JAUMANN, R.:	
Photogrammetrische Anwendungen in der Planetenforschung.	675
WALDHAUS, P.: 100 Jahre Osterreichische Gesellschaft für Photogrammetrie	. 13
WASER, L. I.: SIENE BALTSAVIAS, E., EISENBEISS, H., AKCA, D., WASER, L. I.,	
KUCHLER, M., GINZLER, C. & THEE, P.: Modeling fractional snrub/tree cover and multi temporal changes using high resolution digital surface models and	
	287
WEAVER S Siehe HEROLD M. SAMBALE J. LINDNER M. LIRBAN M & WEAVER S	201
Satellite based monitoring of the national forest resources in the pacific island	
state of Vanuatu.	391
WEHRLE, A. & SCHROTTER, G.: Integration von Geodatensätzen in Google Earth:	
Erarbeitung eines unabhängigen Informationssystems.	199
WEIDNER, U. & BÄHR, HP.: Vergleich von pixel- und segmentbasierter Klassifizierung	
am Beispiel des Kaiserstuhls.	315
WEISENESS, M.: Siehe SCHMIDT, K., NEBEL, K., RATZKE, HP., SMIT-PHILIPP, H. &	
WEISENSEE, M.: Hochwassersimulation im flachen Gelände – sind unsere	
Geobasisdaten ausreichend?	233
WENINGER, B.: SIENE HIRSCHMUGL, M., WENINGER, B., RAGGAM, H. & SCHARDT, M.:	407
MENZEL S. DRAUSCHKE M & EÖRSTNER W: Detektion wiederbeiter und	127
symmetrischer Strukturen in Fassadenhildern	110
WETZEL H-IL' Siehe HELM & WETZEL H-IL MICHAILIOW W REVERLE G	115
REIGBER, CH. & ROTHACHER, M.: Natural Hazard Monitoring with Reflected GPS	
Signals at Merzbacher Glacier Lake.	505
WICKI, P. & LARANJEIRO, L.: Photogrammetrische Erfassung von Fliess- und	
Staublawinen mit digitalen Amateur-Kameras.	659
WIEDEMANN, A., PETER, W. & SCHMITS, M.: Möglichkeiten und Einschränkungen des	
kombinierten Einsatzes digitaler Luftbildkameras und luftgestützter Laserscanner.	617

WIJAYA, A.: Siehe HAHN, C., WIJAYA, A. & GLOAGUEN, R.: Application of Support Vecto Machine for Complex Land Cover Classification using Aster and Landsat Data	r 149
WOHLFEIL, J.: Siehe BÖRNER, A., HIRSCHMÜLLER, H., NEIDHARDT, M., NITZ, M.,	
SCHEIBE, K., WOHLFEIL, J. & ZUEV, S.: Ableitung photogrammetrischer Produkte	
mit der MFC-Kamera.	667
WOLFF, K.: Siehe GRUEN, A., KOCAMAN, S. & WOLFF, K.: High Accuracy 3D	
Processing of Stereo Satellite Images in Mountainous Areas.	625
ZAPPA, M.: Siehe BAUMGARTNER, M., ZAPPA, M., HONG, S. Z., GURTZ, J. &	
SCHÄDLER, B.: Verbesserung der Hochwasservorhersage des Yangtze / Drei-	
Schluchten-Gebiet (China).	353
ZUEV, S.: Siehe BÖRNER, A., HIRSCHMÜLLER, H., NEIDHARDT, M., NITZ, M.,	
SCHEIBE, K., WOHLFEIL, J. & ZUEV, S.: Ableitung photogrammetrischer Produkte	
mit der MFC-Kamera.	667
ZUEV, S.: Siehe GRENZDÖRFFER, G. & ZUEV, S.: Bestimmung des	
photogrammetrischen Genauigkeitspotentials des Online-Systems ANTAR	
zur luftgestützten Verkehrsdatenerfassung.	571