

**Band 18**

**2009**

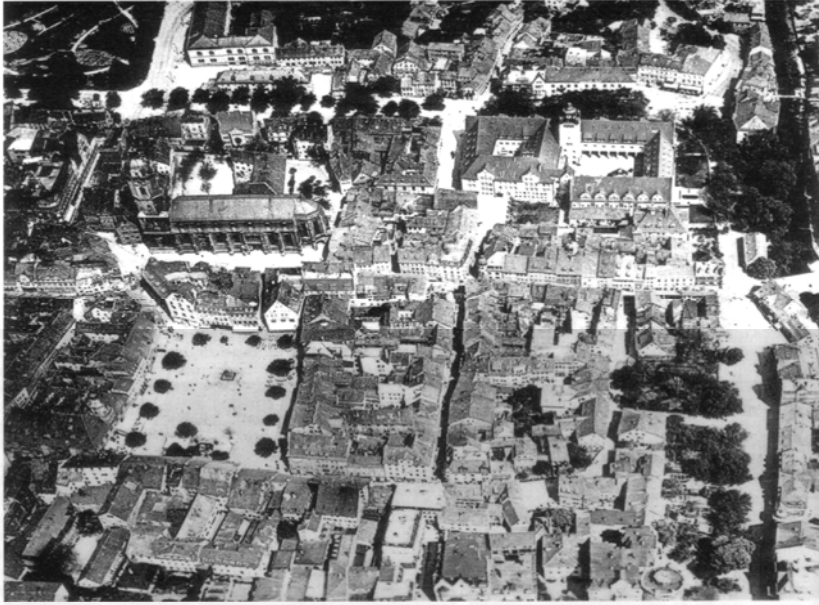


## **Vorträge**

### **29. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF**

24. – 26. März 2009  
in Jena

***Zukunft mit Tradition***



## **Vorträge**

### **29. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF**

24. – 26. März 2009  
in Jena

***Zukunft mit Tradition***

ISSN 0942-2870

Publikationen der  
Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung  
und Geoinformation (DGPF) e.V.  
Band 18, 442 S., Potsdam 2009  
Hrsg.: Eckhardt Seyfert

© Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung  
und Geoinformation (DGPF) e.V.  
Oldenburg 2008

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: [klaus.komp@eftas.com](mailto:klaus.komp@eftas.com)

Druck:

Brandenburgischer IT-Dienstleister  
Dortustraße 46, 14467 Potsdam  
Tel.: (03 31) 39 - 8 80, Fax: (03 31) 2 75 48 - 10 14

## Vorwort

Die 29. wissenschaftlichen-technischen Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation findet vom 25. bis 26. März 2009 statt.

Bereits das Motto der Tagung

*„Zukunft mit Tradition“*

lässt die Besonderheit dieser Jahrestagung erkennen.

Vor 100 Jahren haben Pioniere der Photogrammetrie in Jena beschlossen, eine wissenschaftliche Fachgesellschaft zu gründen. Es ist uns eine besondere Freude, dieses Jubiläum am Gründungsort begehen zu können.

Die Tagung gibt Gelegenheit für einen Rückblick; vor allem aber wollen wir den aktuellen Stand unserer Fachdisziplinen diskutieren und mit einem Ausblick in die Zukunft schließen wir die Veranstaltung.

Die Tagung 2009 wird erstmals mit der in Oldenburg beschlossenen neuen Struktur der Arbeitskreise ausgerichtet. Dies führt zu einem erweiterten inhaltlichen Spektrum verbunden mit vielen parallelen Sitzungen. Eine weitere Besonderheit der Tagung 2009 wird die Vorstellung der ersten Ergebnisse des DGPF-Kamera-Evaluierungsprojektes sein, an dem im Sommer 2008 zahlreiche Firmen und Institute beteiligt waren und dass bereits jetzt eine sehr große nationale und internationale Resonanz findet.

Die Vielfalt der Vorträge, Poster und Veröffentlichungen zeigt eindrucksvoll die rasanten Entwicklungen unserer Fachgebiete und die Leistungsfähigkeit von Wissenschaft und Wirtschaft in der Gegenwart. Auf die künftigen Tagungen darf man bereits heute gespannt sein, nimmt die Bedeutung von Geodaten, ihrer Prozessierung, Analyse und Präsentation in allen Bereichen von Wirtschaft, Verwaltung und Wissenschaft eine immer größere Bedeutung ein.

In Namen des Vorstandes möchte ich allen Organisatoren der Tagung, den 119 Autoren der 69 Beiträge und dem Herausgeber sehr herzlich für ihr Engagement danken. Ohne Sie alle wären die Tagung und das Erscheinen des Tagungsbandes nicht möglich gewesen.

Wir wünschen Ihnen interessante und vielfältige Tage in Jena.

Prof. Dr. habil. Cornelia Gläßer  
Präsidentin





# INHALTSVERZEICHNIS

## DGPF-Projekt Kameraevaluierung

(Leitung: Dr.-Ing. Michael Cramer / Prof. Dr.-Ing. Ralf Reulke)

CRAMER, M.; KRAUß, H.; JACOBSEN, K.; V. SCHÖNERMARK, M.; HAALA, N. & SPRECKELS, V.: Das DGPF-Projekt zur Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme. ....	9
HAALA, N. & WOLFF, K.: Digitale photogrammetrische Luftbildkamerasysteme – Evaluation der automatischen Generierung von Höhenmodellen. ....	23

## AUS- UND WEITERBILDUNG

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

KATTERFELD, C. & KÖNIG, G.: E-Learning Angebote und ihre Qualität. ....	33
NEUMANN, S.; SIEGMUND, A.; DITTER, R.; HASPEL, M.; KOLLAR, I. & SIEGMUND, A.: Satellitenbilder in der Schule – von der Theorie zur praktischen Anwendung. ....	41
VOSS, K.; GOETZKE, R. & HODAM, H.: Interaktive Lernmodule zum Thema Fernerkundung – Balance zwischen analoger Bildinterpretation und umfangreichen Softwarelösungen. ....	51

## AUSWERTUNG FERNERKUNDUNGSDATEN

(Leitung: Dr.-Ing. Horst Weichelt)

DRAUSCHKE, M.; FÖRSTNER, W. & BRUNN, A.: MULTIDODGING: Ein effizienter Algorithmus zur automatischen Verbesserung von digitalisierten Luftbildern. ....	61
FREY, D. & BUTENUTH, M.: Analysis of Road Networks after Flood Disasters using Multi-sensorial Remote Sensing Techniques. ....	69
HESE, S.: Structural Analysis of Thermokarst Lake Change in Siberia with Corona and Quickbird Satellite Data. ....	79
MÜTERTHIES, A.; BÜSCHER, O. & BUCK, O.: DeCOVER – Konzept für nationale Geoinformationsdienste. ....	87
SCHIEWE, J.; EHLERS, M.; KINKELDEY, C. & TOMOWSKI, D.: Modellierung von Unsicherheiten in klassifizierten, räumlich hoch aufgelösten Fernerkundungsszenen. ....	93
VÖLKER, A. & BÜKER, C.: RapidEye – Das “schnelle Auge” für das Monitoring von Cross-Compliance-Landschaftselementen? Eine Potentialanalyse mit simulierten Satellitendaten. ....	101
WEIDNER, U.: Zur Bewertung von Panschärfungsverfahren. ....	111

## **BILDANALYSE UND BILDVERSTEHEN**

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

BAJRAMOVIC, F. & DENZLER, J.: Experimentelle Auswertung von Unsicherheitsmaßen auf relativen Posen für die Multikamerakalibrierung. ...	119
BOOCHS, F.; KERN, F.; SCHÜTZE, R. & MARBS, A.: Ansätze zur geometrischen und semantischen Modellierung von großen, unstrukturierten 3D-Punktmengen. ....	127
FÖRSTNER, W.: Mustererkennung in der Fernerkundung. ....	129
NIEMEYER, I.; BACHMANN, F.; BRATSKIKH, A.; JOHN, A.; KRISTINSDÓTTIR, B.; LISTNER, C. & MARPU, P.R.: Techniques for object-based image analysis. ...	137
PRÄTEL, K.: Lokalisierung von Objekten in Herbarbelegen. ....	147
REINHOLD, M.; MATEJKA, E. & SELSAM, P.: IMALYS – Konzept und Entwicklung objektorientierter Klassifikation auf Datenbankbasis. ....	157
STEINKE, K.-H.: Lokalisierung von Schrift in komplexer Umgebung. ....	165

## **FERNERKUNDUNG UND GEOLOGIE**

*(Leitung: Dr. Hans-Ulrich Wetzel)*

BOUAZIZ, M.; LEIDIG, M.; KNOCH, M. & GLOAGUEN, R.: Contribution of remote sensing and GIS to the qualitative assessment of eroded surfaces in the main Ethiopian rift. ....	175
MAHMOOD, S.A.; SHAHZAD, F. & GLOAGUEN, R.: Remote Sensing Analysis of Quaternary Deformation and Landscape Responses Using SRTM Digital Elevation Model for Kabul River, Hindukush. ....	183
LI, N.; FREI, M. & ALTERMANN, W.: Improvement on Lithologic Classification of remote sensing data using Knowledge-Based Classifier in Southwestern Prieska sub-basin, Transvaal Supergroup, South Africa. ....	191
SHAHZAD, F.; MAHMOOD, S.A. & GLOAGUEN, R.: Morphometric analysis of Kohat Plateau (Pakistan) using Digital Elevation Models. ....	201
WIJAYA, A. & GLOAGUEN, R.: Multi Source Remotely Sensed Data for Land Cover Classification and Biomass Estimation using Non Linear Methods. ...	207

## **GEOINFORMATIK**

*(Leitung: Prof. Dr.-Ing. Thomas H. Kolbe)*

AGUGIARO, G. & KOLBE, T. H.: Embedding of high resolution models into a low(er) resolution digital elevation model. ....	217
--	-----

HOEGNER, L. & STILLA, U.: Aufbereitung von mehrfachen IR-Fassadentexturen

dreidimensionaler Gebäudemodelle für thermische Inspektionen. ....	227
KRÜCKHANS, M. & SCHMITTWILKEN, J.: Attributierte Grammatiken zur artifiziellen Verfeinerung von 3D-Stadtmodellen. ....	235
MEINEL, G.: Konzept und Struktur eines Monitors der Siedlungs- und Freiraumentwicklung. ....	245

## **HYPERSPEKTRALE FERNERKUNDUNG**

*(Leitung: Dr.-Ing. András Jung)*

FRICKE, T.; BIEWER, S.; PERBANDT, D.; ERASMI, S. & WACHENDORF, M.: Spektrometrische Methoden als Grundlage für eine bedarfsgerechte Bewirtschaftung im Futterbau. ....	253
GÖTZE, C.; JUNG, A.; HENRICH, V. & GLÄßER, C.: Spektrometrische Analysen in einem Vergleich mit den physiologischen Bedingungen von schwermetall- gestresster Vegetation in einem standardisierten Experiment. ....	259
JUNG, A.; GÖTZE, C. & GLÄßER, C.: Untersuchung der Variabilität der Messsignale von vier hyper-spektralen Labor- und Feldmessgeräten. ....	267
KLONUS, S. & EHLERS, M.: Auswirkungen der Bildfusion auf Hyperspektraldaten. ....	277
LAUSCH, A. & PAUSE, M.: Skalenspezifische hyperspektrale Fernerkundung mit dem Airborne Imaging Spectrometer for Application (AISA-EAGLE/HAWK 400-2500nm). ....	287

## **INTERNATIONALE STANDARDISIERUNG**

*(Leitung: Prof. Dr.-Ing. Ralf Reulke)*

CRAMER, M.: Kalibrierung und Standards für digitale Luftbildkameras. ....	295
---	-----

## **NAHBEREICHSPHOTOGRAMMETRIE**

*(Leitung: Prof. Dr.-Ing. Heinz-Jürgen Przybilla)*

BETHMANN, F.; HERD, B.; LUHMANN, T. & OHM, J.: 3D-Erfassung von Freiform- flächen aus Bildsequenzen unter Berücksichtigung von Störobjekten. ....	303
--	-----

## **RADARFERNERKUNDUNG, FLUGZEUGLASERSCANNING**

*(Leitung: Dr. Uwe Sörgel)*

GROSS, H.; JUTZI, B. & THOENNESSEN, U.: Classification of Elevation Data based on analytical versus trained Feature Values to determine Object Boundaries. ....	315
KLONUS, S. & EHLERS, M.: Vergleich von unterschiedlichen Verfahren zur Fusion von TerraSAR-X und optischen Daten. ....	327

KNUTH, R.; ECKARDT, R.; RICHTER, N.; THIEL, C. & SCHMULLIUS, C.: FRA-SAR 2010 – Analyse von hoch auflösenden SAR Daten in den Tropen, eingebettet in die globale Waldinventur der FAO. ....	337
KOCH, B.; HEINZEL, J.; GUPTA, S.; WANG, Y. & WEINACKER, H.: Extraction of forest parameter from laser data. ....	345
REITBERGER, J.; KRZYTEK, P. & STILLA, U.: First/Last Pulse und Full Waveform Laserscanning zur 3D Kartierung von Wäldern. ....	355
RESSL, C.; MANDELBURGER, G. & PFEIFER, N.: Untersuchungen zur Verbesserung der Georeferenzierung von ALS-Streifen ohne Verwendung von GNSS-IMU-Trajektorien. ....	365
THIEL, C.; THIEL, CH.; REICHE, J.; LEITERER, R. & SCHMULLIUS, C.: Großflächige Waldüberwachung in Sibirien unter Verwendung von ALOS PALSAR Winter Kohärenzen und Sommer Intensitäten. ....	377
WEGNER, J.D.; AUER, S. & SÖRGEL, U.: Analyse urbaner Gebiete mit optischen Bildern und SAR-Bildern sehr hoher Auflösung. ....	387
WEIHING, D.; HINZ, S.; SUCHANDT, S.; RUNGE, H. & BAMLER, R.: Traffic Information Extraction using TerraSAR-X Data. ....	399

## **SENSOREN UND PLATTFORMEN**

*(Leitung: Dr. Rainer Sandau)*

EISENBEISS, H.; STEMPFHUBER, W. & KOLB, M.: Genauigkeitsanalyse der 3D-Trajektorie von Mini-UAVs. ....	407
JACOBSEN, K.: Potential höchstauflösender optischer Weltraumbilder. ....	419
WIEDEMANN, A.: Photogrammetrische Schrägluftbilder mit dem Aerial Oblique System AOS. ....	427

<b>AUTORENVERZEICHNIS</b> .....	435
---------------------------------	-----

## Das DGPF-Projekt zur Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme

**MICHAEL CRAMER<sup>1</sup>, HERBERT KRAUß<sup>2</sup>, KARSTEN JACOBSEN<sup>3</sup>, MARIA VON SCHÖNERMARK<sup>4</sup>,  
NORBERT HAALA<sup>5</sup> & VOLKER SPRECKELS<sup>6</sup>**

*Zusammenfassung: Während der DGPF-Jahrestagung 2008 wurde das DGPF-Projekt zur Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme erstmals öffentlich in größerem Rahmen vorgestellt. Ein Jahr nach dieser Vorstellung sind die Testdaten erfasst. Die Auswerteteams haben sich gefunden, und die nach Schwerpunkten durchgeführten Auswertungen finden aktuell statt. Dieser Beitrag versucht eine zusammenfassende Darstellung der wesentlichen Projektparameter, erste Ergebnisse und Erfahrungen werden vorgestellt. Allerdings kann auf die Detailauswertungen nicht eingegangen werden. Die große Resonanz, die schon jetzt durch das Projekt hervorgerufen wurde, belegt seine Bedeutung und Relevanz für die aktuellen Arbeiten im Bereich der digitalen Photogrammetrie.*

### 1 Hintergrund

Digitale Luftbildkamerasysteme werden zunehmend für kommerzielle Anwendungen genutzt. Verschiedene europäische Landesvermessungsinstitutionen haben bereits vollständig auf die digitale Bilddatenerfassung umgestellt. Sieht man von wenigen Ausnahmen ab, fehlen aber noch immer neutrale auf breiter Basis durchgeführte Tests, die fundierte Qualitätsbeurteilungen der unterschiedlichen Kamerasysteme in ihren aktuellen Versionen erlauben.

Der im Rahmen der EuroSDR durchgeführte internationale Test zur Kamerakalibrierung und Validierung beruht auf z.T. recht alten Bildflugdaten (Testflüge in 2003/04). Die neuen Systementwicklungen (Ultracam-X, ADS40 2nd generation) sind nicht berücksichtigt worden, da nicht vorhanden. Außerdem musste mangels anderweitiger Daten auf zwei verschiedene Testgebiete zurückgegriffen werden. Nur für einen Flug war qualitativ ausreichendes GPS/inertial Datenmaterial vorhanden. Die geflogenen Blockgeometrien waren außerdem sehr unterschiedlich, sodass Vergleiche des kameraspezifischen Potenzials nur bedingt möglich waren. Fokus dieser Untersuchungen lag zudem ausschließlich auf der Analyse der

---

<sup>1</sup> M. Cramer, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24D, 70174 Stuttgart, E-Mail: michael.cramer@ifp.uni-stuttgart.de

<sup>2</sup> H. Krauß, RWE Power AG, Abt. PBT-P Geobasisdaten/Photogrammetrie, Stüttgenweg 2, 50935 Köln, E-Mail: herbert.krauss@rwe.com

<sup>3</sup> K. Jacobsen, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, Leibniz Universität Hannover, Nienburger Str. 1, 30167 Hannover, Email: jacobsen@ipi.uni-hannover.de

<sup>4</sup> M. von Schönermark, Institut für Raumfahrtsysteme, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart, E-Mail: schoenermark@irs.uni-stuttgart.de

<sup>5</sup> N. Haala, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24D, 70174 Stuttgart, E-Mail: norbert.haala@ifp.uni-stuttgart.de

<sup>6</sup> V. Spreckels, RAG AG Deutsche Steinkohle, Geschäftsbereich Geoinformation / Vermessung BG G, Shamrockring 1, 44623 Herne, Email: volker.spreckels@rag.de

geometrischen Genauigkeit der Objektpunktbestimmung (CRAMER 2007). Parallel dazu wurden vergleichbare Tests auf nationaler Ebene z.B. in Finnland unter Regie des Finnischen Geodätischen Instituts (FGI) (HONKAVAARA et al. 2006) und im Rahmen einer Kooperation zwischen BAE Network Systems und der Leibniz Universität Hannover (JACOBSEN 2008) durchgeführt. In diesen Untersuchungen wurden neben geometrischen Fragestellungen auch radiometrische Aspekte untersucht. Zwischenzeitlich koordiniert das FGI in Zusammenarbeit mit dem Institut Cartographic de Catalunya, Barcelona ein im Mai 2008 eingerichtetes neues EuroSDR Projekt zur Untersuchung der radiometrischen Qualität digitaler Luftbildkameras (HONKAVAARA et al. 2009).

Aufgrund der sehr heterogenen Systemkonfigurationen digitaler Luftbildkameras werden empirische Flugtests in kontrollierten Umgebungen fester Bestandteil zukünftiger Systemzertifizierungen und Validierungen werden. Nur so sind mit standardisierten Prozessen kameraspezifische Qualitätsaussagen möglich. Die bislang geforderten Kalibrierzertifikate, die in gewisser Weise auch den Nachweis über die korrekte Systemfunktion erbracht haben, werden an Bedeutung verlieren. Die neu angewandten Verfahren der Systemkalibrierung digitaler Kameras durch die Hersteller sind (noch) nicht unabhängig zertifiziert. Vor allen Dingen ist aber eine allgemeine Verlagerung von Labor- zu in-situ Kalibrierungen festzustellen. So genannte „burn-in flights“ sind fester Bestandteil der herstellerseitigen Kalibrierung für DMC, Ultracam und ADS. Im Falle der ADS werden zur geometrischen Kalibrierung keine klassischen Labormessungen durch Goniometer mehr durchgeführt. Die Verzeichnungsparameter der Optik werden ausschließlich durch in-situ Kalibrierung gewonnen, ausgehend von den für die Produktion spezifizierten Optikparametern (TEMPELMANN & HINSKEN 2007). Das Verfahren der in-situ Kalibrierung ist für Kameras die auf kleineren Aufnahmeformaten basieren (z.B. Mittelformatsysteme) fast unumgänglich. Im Regelfall kann nicht davon ausgegangen werden, dass a priori bestimmte Kameraparameter auch für die jeweils aktuellen Flugumgebungen Gültigkeit besitzen.

Die Entwicklung von neuen Standards und Zertifizierungsverfahren für digitale Luftbildkameras ist aktuelles Thema in verschiedensten Organisationen. Die seitens des DIN Normenausschusses Bauwesen, Arbeitsausschuss Photogrammetrie und Fernerkundung, verfasste Normenreihe 18740 „Photogrammetrische Produkte“ wurde im September 2007 um einen Teil 4 „Anforderungen an digitale Luftbildkameras und an digitale Luftbilder“ (DIN 18740-4) erweitert. Diese Norm scheint zumindest für Europa einzigartig zu sein und könnte somit auch Grundlage für weitere nationale und internationale Normungsvorhaben werden. Die DIN 18740-4 verweist explizit auf die Möglichkeit einer so genannten Validierungsprüfung über einem signalisierten Testfeld, um „die erreichte Genauigkeit zum Überprüfungszeitpunkt mit der erreichten Lage- und Höhenmessgenauigkeit des Kamerasystems unmittelbar nach der Herstellerkalibrierung (Referenzmessung)“ zu ermitteln, lässt die anzuwendenden Methoden und Anforderungen an das Testfeld aber offen. Auch vor diesem Hintergrund sind empirische Praxistests und daraus abzuleitende Testmethoden von hoher Relevanz.

## 2 Projektorganisation

Auf Nachfrage verschiedener Photogrammetriefirmen und Anwender nach hersteller-unabhängigen Tests hat die Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) Ende 2007 erste Konzepte zur Durchführung eines Evaluierungstests möglichst aller zurzeit kommerziell verfügbaren digitalen Luftbildkamerasysteme entwickelt. Dabei soll das Potenzial der Kamerasysteme umfassend untersucht werden, d.h. neben den Analysen zur geometrischen Genauigkeit und dem räumlichen Auflösungsvermögen, sollen auch die radiometrische Qualität der Bilddaten und die Genauigkeit von abgeleiteten Produkten aus der automatischen Höhenmodellgenerierung und dem Stereoplotting analysiert werden. Das Ziel liegt nicht im Vergleich der Systeme untereinander, sondern im Aufzeigen des jeweiligen Genauigkeitspotenzials und dem Herausarbeiten systemspezifischer Anwendungsfelder. Diese gibt Praxisanwendern Hinweise für die Auswahl von Systemen für bestimmte Anwendungen. Die Testflugdaten der beteiligten Systeme wurden im Sommer 2008 unter möglichst vergleichbaren Bedingungen in einer kontrollierten Testfeld-Umgebung (Testfeld Vaihingen/Enz) erfasst.

Um die Auswertungen wissenschaftlich auf eine möglichst breite Basis zu stellen sind verschiedene Institutionen, hauptsächlich unabhängige Forschungseinrichtungen, mit den Evaluierungen beschäftigt. Dazu wurden institutionsübergreifende Auswerteteams gebildet, mit den Auswerteschwerpunkten Geometrie, Radiometrie, Höhenmodelle und Stereoauswertung. Die verschiedenen Institutionen in diesen Auswerteteams arbeiten sehr eng zusammen. Arbeitsfortschritte und Zwischenergebnisse werden teamintern und an die Gesamtprojektleitung mitgeteilt. Diese Tätigkeiten werden durch die Projektleitung und die jeweiligen Leiter der Auswerteteams koordiniert (Kontaktinformation siehe Autorenliste). Koordinierungstreffen der Projektteilnehmer bzw. Mitglieder eines Auswerteteams haben bereits stattgefunden.

Die Daten der Befliegungen wurden von den Bildflugfirmen über die Hersteller dem Projekt zur Verfügung gestellt. Die weitere Verteilung an die Projektbeteiligten erfolgt zentral über die Projektleitung (Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart). Die Datennutzung unterliegt einer speziellen Vereinbarung, die vom DGPF-Vorstand bereitgestellt, veröffentlicht und von jedem Datennutzer vorab rechtsverbindlich zu unterzeichnen ist. Mit dieser Projektvereinbarung definiert der Teilnehmer auch seine Arbeitsschwerpunkte und den vorgesehenen Auswertezeitplan. Im Abschnitt 8 sind alle Institutionen aufgeführt, die zum Zeitpunkt der Berichtserstellung eine entsprechende Projektvereinbarung vorgelegt haben und an die zum großen Teil auch schon Datensätze ausgeliefert wurden.

Alle Untersuchungen werden in enger Absprache mit den Kameraherstellern durchgeführt. Die Teams stehen untereinander in engem Austausch. Über die Testabläufe und -statistiken wird projektintern über Emailaustausch und in der PFG berichtet. Auf der DGPF-Jahrestagung 2008 wurde das Projekt erstmals öffentlich präsentiert, die Jahrestagung 2009 bietet die Möglichkeit erste Projektergebnisse in größerer Runde zu veröffentlichen und zu diskutieren.



### 3 Testdaten

Für die Durchführung der Testflüge wurde das vom Institut für Photogrammetrie (ifp) der Universität Stuttgart eingerichtete Testfeld Vaihingen/Enz ausgewählt. Dieses Testfeld existiert seit 1995 und wurde bereits für verschiedenste Evaluierungen genutzt (CRAMER 2005). Das Gebiet verfügt über knapp 200 signalisierte Punkte, die sich auf eine Fläche von 7,5 x 5,0 km<sup>2</sup> verteilen. Zusätzliche Testtargets zur Bestimmung der geometrischen und radiometrischen Auflösungen wurden für die DGPf-Befliegungen im Testfeld ausgebracht. Es handelt sich hierbei um bedruckte LKW-Planen der Größe 2x2m<sup>2</sup>, die z.T. monochrom eingefärbt bzw. mit einem Siemensstern versehen sind. Diese Planen wurden von der RAG Deutsche Steinkohle zur Verfügung gestellt. Weiterhin verfügt das Referenzfeld noch über einen Siemensstern mit 8m Durchmesser. Parallel zu allen Flügen wurden Bodenreferenzmessungen mit Spektrometern bzw. Sonnenphotometern mit z.T. mehreren Systemen durchgeführt.

#### 3.1 Bildflüge

Die Testflüge sollten ursprünglich in einem 2-Wochen Zeitraum ab 26. Mai 2008 durchgeführt werden, aufgrund der ungünstigen Witterungsbedingungen haben die Befliegungen aber letztlich in einem deutlich größeren Zeitfenster von ca. 10 Wochen (2.7. – 19.9.2008) stattgefunden. Die bisher für Auswertungen im Projekt vorgesehenen Bilddaten wurden an 6 verschiedenen Flugtagen erfasst. An zwei weiteren Flugtagen erfolgte die Erfassung der AISA+ Hyperspektral- bzw. ALS50 LiDAR-Daten. Die Flugplanungen wurden von der Projektkoordination in Absprache mit den Herstellern durchgeführt, wobei die spezielle Testfeldgeometrie zu berücksichtigen war. Die zu testenden Kamerasysteme sind mit vergleichbaren Bodenauflösungen (GSD 20cm bzw. GSD 8cm) und Überdeckungsverhältnissen in im Regelfall zwei Flughöhen geflogen worden. Eine parallele Aufzeichnung von GPS/inertial-Daten liegt für die meisten Systeme vor. In jeder Flughöhe wurden sogenannte Geometriestreifen (ost-west/west-ost Flugstreifen mit zwei optionalen Querstreifen) und Radiometriestreifen (nord-süd und süd-nord, über die Testtargets) realisiert. Die Tabelle 1 dokumentiert die in der Kampagne durchgeführten Testflüge. Details zu den Flugplanungen und Datenerfassungen sind auch CRAMER (2008a), CRAMER (2008b) und DGPf (2009) zu entnehmen. Ebenfalls angegeben sind die beteiligten Flugfirmen und der Zeitpunkt der Datenübergabe seitens der Hersteller an das Projekt.

Der RMK-Flug wurde parallel zu der DMC-Befliegung als echter Doppelkameraflug durchgeführt. Die Fluggeometrie wurde dabei durch die DMC-Flugplanung festgelegt. Für den Block GSD 20cm wurde CIR-Filmmaterial verwendet, für den großmaßstäbigen Block GSD 8cm Color-Negativ-Film. Beide DMC-Bildblöcke sind entgegen der Planungen mit ca. 60/60 Überdeckungen geflogen. Für den DMC Datensatz GSD 8cm wurde ein Korrekturgitter (Collocation Grid) zur Kompensation verbleibender systematischer Bildfehler bestimmt und in den Bildern angebracht. Dieses Gitter wurde projektbezogen direkt aus den Flugdaten abgeleitet. Dieses Korrekturgitter wurde aber nicht in den GSD 20cm Bildern angebracht. Für den Ultracam-X Datensatz liegen derartige Bildkorrekturen optional ebenfalls vor. Die JAS-150 wurde zweimal über dem Testfeld geflogen. Der zweite Flug war notwendig, da die Daten des ersten Fluges wegen nicht optimaler Lichtverhältnisse und nicht korrekter Kommandierung der

Kamera für die Zwecke der geplanten Auswertung nicht zu verwenden waren. Der Datensatz der DigiCAM quattro ist durch Defokussierung eines Kamerakopfes beeinträchtigt. Ein Sensorkopf war bei der Befliegung auf 70m fokussiert. Dieser Fehler wirkt sich nicht bei der Triangulation der Bilddaten aus. Mit der AIC-x1 konnte nur der GSD 8cm Block erfasst werden. Von ursprünglichen Planungsvorgaben wurde abgewichen. Beim späteren Flug mit der AIC-x4 wurden nur drei der vier Kameraköpfe ausgelöst. Dieser Datensatz soll als 3-Kopf-Flug in den weiteren Auswertungen berücksichtigt werden. Beide Bilddatensätze liegen der Projektleitung momentan noch nicht vor. Die DLR 3K-Kamera hat nur die Flüge GSD 20cm realisiert.

System	Hersteller	Flugfirma	Flugtag(e)	Datenübergabe an Projektleitung
DMC	Intergraph/ZI	RWE Power	24.07.08 06.08.08	08.10.08
ADS 40, 2nd	Leica Geosystems	Leica Geosystems	06.08.08	29.10.08
JAS-150	Jenaoptronik	RWE Power	09.09.08	08.12.08
Ultracam-X	Vexcel Imaging Graz	bsf Swissphoto	11.09.08	15.12.08
RMK-Top15	Intergraph/ZI	RWE Power	24.07.08 06.08.08	19.08.08 12.09.08
DigiCAM quattro	IGI	Geoplana	06.08.08	16.09.08
AIC-x1	Rolleimetric	Alpha Luftbild	11.09.08	steht noch aus
AIC-x4	Rolleimetric	Vulcan Air	19.09.08	steht noch aus
DLR 3K-Kamera	DLR München	DLR München	15.07.08	03.09.08
AISA+ hyperspektral	specim-FH Anhalt	RWE Power	02.07.08	28.10.08
ROSIS hyperspektral	DLR München	DLR München	15.07.08	12.11.08
ALS 50 LiDAR	Leica Geosystems	Leica Geosystems	21.08.08	29.10.08

Tabelle 1: Beteiligte Kamerasysteme und Flugtermine

In Ergänzung ist weiterhin anzumerken, dass die Flüge nicht unter vollkommen identischen Bedingungen durchgeführt werden konnten. Einige Datensätze sind durch Wolkenschatten beeinträchtigt, bzw. mussten unter einer Hochbewölkung geflogen werden. Um überhaupt noch eine realistische Chance auf Flugtage zu haben, musste mit fortschreitender Zeit von dem geforderten Kriterium Flug bei 0/8 Bewölkung abgewichen werden. Die Vorgabe, die Radiometriestreifen zum Zeitpunkt des Sonnehöchststandes zu befliegen, konnte nicht in allen Fällen eingehalten werden. Parallel zu den Flügen aufgezeichnete Bilder einer Webcam im Befliegungsgebiet dokumentieren ebenfalls die aktuelle Wettersituation.

## 3.2 Referenzdaten

Die Referenzdaten spielen eine entscheidende Rolle im gesamten Auswerteprozess. Im Rahmen der DGPF-Evaluierungstests wurden diese Referenzdaten durch Bodenmessungen und aus der Luft erfasst.

### 3.2.1 Bodenmessungen und Feldbegehungen

Neben den im Testgebiet Vaihingen/Enz koordinierten Passpunkten wurden parallel zu den Befliegungen weitere Referenzmessungen bzw. Begehungen am Boden realisiert. Zeitgleich zum Überflug des so genannten Radiometristreifens, in dessen Zentrum die bereits oben erwähnten Referenztargets (Farbtafeln und Siemenssterne) lagen, wurden vom Institut für Raumfahrtssysteme (IRS) der Universität Stuttgart Bodenspektrometer-, BRDF- und Sonnenphotometermessungen zur Bestimmung der spektralen Eigenschaften von Objektoberflächen durchgeführt. Die aerosoloptische Tiefe ist ein Maß für die aufgetretene Absorption und Streuung durch die atmosphärischen Aerosole und wird zur Bestimmung der Bestrahlungsstärke und einer eventuellen Atmosphärenkorrektur benötigt. Damit erlauben die Sonnenphotometerdaten zugleich Rückschlüsse auf die aktuelle Bewölkungssituation. Zusätzlich wurden noch die winkelabhängigen Reflexionen im blauen, grünen, roten und nahinfraroten Spektralbereich gemessen. Ergänzt wurden die IRS-Bodemessungen an einigen Tagen durch zusätzliche Messungen durch Mitarbeiter von Leica Geosystems, Heerbrugg, und der Martin-Luther-Universität Halle, Institut für Geowissenschaften. Die spektralen Messungen stellen die Grundlage für den Sensorvergleich dar und können für eine Atmosphärenkorrektur verwendet werden.

Ergänzend zu den Spektrometermessungen wurden durch das Institut für Geowissenschaften der Universität Halle und vor allem auch durch das ehemalige Geographische Institut der Universität Düsseldorf umfassende Feldbegehungen durchgeführt. Die Felderfassung konzentrierte sich räumlich auf den zentralen Testfeldbereich (Block GSD 8cm). Die Arbeiten der Universität Halle fokussierten vor allem auf versiegelte Flächen sowie Bereiche der Steinbrüche. Es wurden Referenzflächen kartiert und spektrometriert. Bereits im Frühjahr wurde seitens EFTAS Münster eine Differenzierung zwischen Feldfrucht bedeckten Flächen und solchen mit offener Ackerkrume vorgenommen. Am Ende der Getreideernte erfolgte eine ergänzende Erhebung durch das IGF der Universität Osnabrück und Zwischenkulturen nach erfolgter Getreideernte wurden durch separate Feldbegehung durch C+B Technik Markgröningen im September erfasst. Dadurch ergibt sich eine Zeitfolge, die ebenfalls von Interesse sein kann. Die verschiedenen Feldbegehungen sind zwischenzeitlich zusammengeführt und die unterschiedlichen Vegetationsklassifizierungskataloge aufeinander abgestimmt.

### 3.2.2 Hyperspektralscanner und LiDAR-Befliegungen

Neben den Bodenreferenzmessungen zur radiometrischen Qualitätsanalyse stehen für zwei Flugtage zusätzlich Daten aus Hyperspektralscannerbefliegungen zur Verfügung. Die Befliegung mit dem AISA+ Sensor wurde am 2.7.2008 als Doppelkammerflug mit einer DMC unter vergleichsweise guten atmosphärischen Bedingungen durchgeführt. Das Befliegungsgebiet beschränkte sich auf den inneren Testfeldbereich. Die AISA+ Daten wurden aus einer mittleren Höhe von 1000m ü.G. mit einer Bodenpixelgröße von 0.83m bis 1.1m in 62 spektralen Kanälen

zwischen 397nm - 970nm erfasst. Die ROSIS Hyperspektralscannerbefliegung fand knapp 2 Wochen später in einer Höhe über Grund von ca. 2700m statt. Es wurden 2 Flugstreifen aufgenommen, wobei der sog. Radiometriestreifen zweimal überflogen wurde (einmal von Norden geflogen, einmal von Süden) und ein weiterer Streifen einen Teil des Gebiets der Landnutzungskartierung abdeckt. Die Pixelgröße beträgt 1.5m und das nutzbare Wellenlängenintervall 430–830nm. Es liegen keine parallelen Bilddatenaufzeichnungen vor. Die Hyperspektralscannerdaten dienen als Referenz für die Landnutzungserhebungen. Der Doppelkammerflug AISA+/DMC ermöglicht direkte Vergleiche der AISA+ Daten mit den von DMC registrierten Grauwerten.

Der am 21.8.2008 durchgeführte ALS50-LiDAR-Flug liefert letztlich die Referenzdaten für die spätere Analyse der Höhenmodellgenauigkeiten. Um den zu erwartenden hohen Punktdichten und Genauigkeiten der automatischen DHM-Generierung aus digitalen Bildern Rechnung zu tragen, wurden die ALS50 Daten mit einer Punktdichte von 5 Punkte/m<sup>2</sup> und einem mittleren Punktabstand von ca. 70cm in bzw. 45cm senkrecht zur Flugrichtung erfasst. Auch hier beschränkte sich die Datenerfassung auf den zentralen Testfeldbereich.

## **4 Datenauswertung**

Die Auswertungen im Evaluierungsprojekt wurden thematisch gruppiert und in 4 Schwerpunkte gegliedert. Dazu wurden die Auswerteteams Geometrie (Leitung K. Jacobsen, Leibniz Universität Hannover), Radiometrie (Leitung M. von Schönermark, Universität Stuttgart) und Höhenmodelle (Leitung N. Haala, Universität Stuttgart) mit der Arbeitsgruppe Stereoplotting (V. Spreckels, RAG Deutsche Steinkohle) gebildet.

### **4.1 Auswerteteam Geometrie**

Im Rahmen der Geometrieuntersuchungen soll das Genauigkeitspotential der digitalen Bilder und die optimale Handhabung von Blockausgleichungen untersucht werden. Dieses schließt Blockausgleichungen mit unterschiedlicher Querüberdeckung, unterschiedlicher Passpunktconfiguration und die Selbstkalibrierung mit zusätzlichen Parametern ein. Die Auswirkung der systematischen Bildfehler auf die Einzelmodellauswertung, besonders auf die Höhenermittlung, ist ebenfalls von Bedeutung.

Die Bildkoordinaten der Datensätze werden dabei von mindestens zwei Teilnehmern parallel erfasst und auch an andere Teilnehmer zur Analyse abgegeben. Eine erste Zuordnung der zu untersuchenden Datensätze auf interessierte Projektteilnehmer erfolgte im Rahmen der Projektsitzung im November 2008 in Hannover. Da die JAS-150 Datenauswertung auf spezieller Software beruht, die z.T. nur nach Schulung anzuwenden ist, musste die Datenauswertung von einer unabhängigen Institution aber vor Ort in Jena durchgeführt werden. Diese Erstauswertung ist zwischenzeitlich durch zwei Vertreter der RAG Deutsche Steinkohle erfolgt. Die Fragen der praktischen Anwendung digitaler Kameras stehen bei dem DGPf-Kamerateam im Vordergrund, aus diesem Grund soll die Auswertung primär mit den Standardprodukten der Kameras durchgeführt werden – bei der DMC und der Ultracam-X sind das die virtuellen Bilder (zusammengefügte Bilder), die standardmäßig aufbereitet sind. Weitere ergänzende Untersuchungen z.B. mit a priori von systematischen Restfehlern befreiten Bildern sind ebenfalls denkbar.

## **4.2 Auswerteteam Radiometrie**

Im Auswerteteam Radiometrie gibt es zwei Schwerpunktrichtungen: Die Untersuchungen der radiometrischen Qualität, i.W. basierend auf den Spektromettermessungen natürlicher bzw. künstlicher Referenzflächen, werden ergänzt durch die fernerkundlichen Fragestellungen im Bereich der Landnutzungsklassifikation. Für den ersten Schwerpunkt müssen zunächst die gemessenen Bodendaten aufbereitet und analysiert werden. In der weiteren Auswertung sollen die gemessenen Boden- und Atmosphärendaten genutzt werden, um die radiometrischen Eigenschaften der Kameras einzuschätzen. Da die Sonnenphotometermessungen deutlich Zeiten mit Bewölkung vor der Sonne ausweisen, soll der Fokus zunächst auf die Flüge bzw. Flugabschnitte mit wolkenfreien Messungen gelegt werden.

Die bereits unter den Referenzdaten vorgestellten Feldbegehungen ermöglichen Vegetationsdifferenzierungen basierend auf automatischen Klassifizierungen, wobei die Variabilität der Flächen über den Befliegungszeitraum zu beachten ist.

## **4.3 Auswerteteam Höhenmodelle / Stereoplotting**

Innerhalb dieses Auswerteschwerpunkts soll für die erfassten Bilder das Potenzial der Höhenmodellgenerierung mittels automatischer Bildzuordnung untersucht werden. Zudem soll evaluiert werden, welche Qualität bei der stereophotogrammetrischen Auswertung dieser Bilder an digitalen Stereo-Auswertestationen durch Photogrammetrie-Operateure erreichbar ist. Der Schwerpunkt der Untersuchungen zur automatischen Generierung von Höhenmodellen bzw. zum Stereoplotting liegt zunächst im zentralen Bereich des Testfelds, für den die Blöcke mit einer GSD von nominell 8cm erfasst wurden. Eine möglichst zeitnahe Bearbeitung und eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse soll durch Verwendung einer einheitlichen Orientierung (sog. Soll-Orientierung) der für die Höhenmodellgenerierung genutzten Bilder erreicht werden. Zu Vergleichszwecken stehen die 3D Punktwolken der LiDAR-Befliegung zur Verfügung, des Weiteren kann auf die im Rahmen der Feldbegehung erfasste Klassifizierung zurückgegriffen werden, um den Einfluss von Vegetation zu berücksichtigen. Um die Qualitätsanalyse und den Vergleich der Höhendaten für unterschiedliche topographische Situationen und Landbedeckungen zu ermöglichen, wurden vom Auswerteteam geeignete Regionen für die automatische DHM-Generierung und das Stereoplotting definiert. In diesen Gebieten sind demnach auch Vergleiche beider Verfahren möglich. In HAALA & WOLFF (2009) werden die Untersuchungen und erste Ergebnisse der automatischen Höhenmodellgenerierung vorgestellt.

## **5 Soll-Orientierung für die Höhenmodellgenerierung**

Die Arbeitsgebiete Höhenmodelle / Stereoplotting und in gewissem Maße auch Untersuchungen im Bereich Radiometrie (BRDF-Analysen) setzen auf orientierten Bilddaten auf. Die Georeferenzierung und umfassende Analyse der geometrischen Genauigkeit im Rahmen der AT ist der Schwerpunkt des Arbeitspakets Geometrie (siehe oben). Um aber auch für die DHM-Generierung möglichst bald mit den praktischen Auswertungen beginnen zu können, andererseits aber auch die Vergleichbarkeit der später von unterschiedlichen Institutionen generierten Produkte zu ermöglichen, ist für alle Datensätze eine Soll-Orientierung zur Verfügung zu stellen. Sie beruht auf einer Aerotriangulation mit manuell und automatisch gemessenen Punkten unter

Verwendung aller Passinformationen im Objektraum. Selbstkalibrierung wird mit den klassischen Parametersätzen realisiert. In wie fern andere wie z.B. sensor-spezifisch angepasste Auswertemodelle bessere Ergebnisse liefern, wird in den Arbeiten des Auswerteschwerpunkts Geometrie untersucht.

Aufgrund fehlender standardisierter Schnittstellen können die in der AT bestimmten Zusatzkorrekturen vielfach nicht von den nachfolgenden Programmen übernommen werden. Einige AT-Programme erlauben die Erzeugung von Korrekturgittern, mit denen dann in der vorgesehenen Prozesskette weiter gearbeitet werden kann. Der Übergang in andere Softwarepakete ist meistens nicht vorgesehen. Alternativ besteht die Möglichkeit unter Anwendung der geschätzten Zusatzparameter neue Ausgangsbilder durch Resampling zu generieren, die dann quasi ideale fehlerfreie Bilder repräsentieren. Ein derartiger Ansatz wird z.B. im Nahbereich oder seitens Intergraph für die Berücksichtigung der Kollokationsgitter-Korrekturen in DMC-Bildern angewandt, erscheint hier aber aufgrund der Menge an Bilddaten zum jetzigen Zeitpunkt als nicht praktikabel.

Daher wurde letztlich folgender Ansatz für die Erzeugung der Soll-Orientierung umgesetzt: Zunächst wird eine Aerotriangulation mit Zusatzparametern (hier 44 Parametermodell nach Grün) unter Verwendung aller Passpunkte gerechnet. In dieser AT werden die signifikanten Zusatzparameter und die ausgeglichenen Objektpunkte berechnet. In einem zweiten Schritt wird dann eine AT gerechnet, die keine Zusatzparameter mehr ansetzt, aber um den Einfluss der Zusatzparameter korrigierte Bildkoordinaten verwendet. Als Passpunkte werden alle ausgeglichenen Objektpunkte aus dem ersten Lauf als feste Beobachtung verwendet. Die sich hier ergebenden Orientierungsparameter liefern die zu nutzende Soll-Orientierung für die bildbasierte Generierung der Höhendaten. Teilweise wird dieses Verfahren auch mit dem Begriff einer absoluten Orientierung bezeichnet.

Für die flächenhaft aufzeichnenden Systeme DMC, DigiCAM und Ultracam-X wurde diese Soll-Orientierung vom ifp generiert. Die Bildblöcke GSD 20cm und GSD 8cm wurden jeweils getrennt behandelt. Berücksichtigt sind für jedes Kamerasystem die Geometriestreifen in Ost-West Flugrichtung und die beiden Querstreifen am Blockanfang und -ende gemäß Planungen. Die Tabelle 2 fasst die wesentlichen Ergebnisse der Ausgleichen zusammen.

Angegeben sind jeweils die Ergebnisse der Ausgleichen, die unter Verwendung aller Passpunkte die signifikanten Parameter des 44-Parameter Korrekturpolynoms und die ausgeglichenen Geländekoordinaten der Objektpunkte liefert. Die Passpunkte sind mit einer Genauigkeit von 2cm eingeführt worden. Die durch die Gruppe der signifikant geschätzten Parameter erfassten maximalen Korrekturen an den 25 gleichmäßig verteilten Gitterpunkten im Bild sind angegeben. Da bei den Auswertungen der DigiCAM quattro Kamera jedes der 4 Teilbilder als Einzelbild betrachtet wurde, ist für jeden Kamerakopf ein eigenes Korrekturpolynom eingeführt worden. Die Angaben zur Redundanz, maximalen Verknüpfung und Anzahl der Blockpunkte erlauben eine Einschätzung der Blockgeometrie. Die größere Anzahl von Punkten und höhere Redundanz bei der DigiCAM wird durch die im Vergleich zu DMC und Ultracam-X deutlich kleineren Bildformate und damit größere Anzahl von Bildern verursacht.

Block	Sigma0		# Block- punkte	Redun- danz	Max. Verknüp- fung	# sign. Zusatz- parameter	Max. Korrektur im Bild [ $\mu\text{m}$ ]	
	Bild [ $\mu\text{m}$ ]	Objekt [m]					DX	DY
DMC GSD 8cm	1,49	0,011	9651	80371	13	44	2,23	1,30
DMC GSD 20cm	1,98	0,036	5432	49366	12	10	5,39	3,54
Ultracam-X GSD 8cm	0,95	0,011	6049	109906	28	6	0,72	0,96
Ultracam-X GSD 20cm	1,07	0,031	4729	43932	12	4	0,49	1,13
DigiCAM quattro GSD 8cm	0,99	0,013	30872	629043	33	3 (1)	1,11	0,94
						9 (2)	1,59	2,32
						3 (3)	0,99	1,40
						4 (4)	1,83	1,51
DigiCAM quattro GSD 20cm	1,28	0,039	20501	192240	18	3 (1)	1,05	1,15
						10 (2)	1,89	2,45
						4 (3)	0,92	1,09
						6 (4)	2,15	1,23

Tabelle 2: Aerotriangulation mit 44 Parameter Modell nach Grün

Die gegebenen Werte für Sigma0 repräsentieren die Genauigkeit der Strahlenschnitte nach der Ausgleichung und sind somit ein Maß für die innere Systemgenauigkeit. Sie lassen zunächst noch keine Aussage über die Absolutgenauigkeit zu. Alle Kamerasysteme erzielen aber sehr ähnliche Werte. Die durch die zusätzlichen Parameter im Bildraum hervorgerufenen Korrekturen sind leicht unterschiedlich. Den größten Einfluss haben die Werte im Block DMC GSD 20cm. Die Korrekturen dort unterscheiden sich deutlich von den kleineren Korrekturen des DMC GSD 8cm Blocks. Diese Unterschiede waren aufgrund der Anwendung einer herstellerseitigen vorab durchgeführten Kollokationsgitterkorrektur auf die Bilder des DMC GSD 8cm Blocks zu erwarten. Die verbleibenden systematischen Effekte in den Bildern sind kleiner. Interessanterweise sind für den GSD 8cm Block im Vergleich zu den anderen Auswertungen deutlich mehr signifikante Zusatzparameter zur Bestimmung der Restsystematik notwendig. Insgesamt sind die Korrekturen für alle Systeme im deutlichen Sub-Pixelbereich.

Wie bereits zuvor beschrieben sind die hier bestimmten Korrekturen an den gemessenen Bildkoordinaten angebracht und als Grundlage für die Ausgleichung zur Schätzung der Soll-Orientierungselemente verwendet worden. Für den DMC Datensatz wurde exemplarisch nachgewiesen, dass die DHM-Generierung unter Verwendung der auf den vorab korrigierten Bildkoordinaten basierenden Orientierungselementen zu besseren Ergebnissen führt, vor allem wenn wie beim DMC GSD 20cm Block durch die Zusatzparameter größere Effekte kompensiert werden.

## 6 Zusammenfassung

Das von der DGPF initiierte Projekt zur Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme bietet eine einmalige Chance quasi alle aktuell verfügbaren Sensoren unter möglichst vergleichbaren Aufnahmebedingungen zu untersuchen. Das Hauptaugenmerk dieser Evaluierung liegt auf dem Herausarbeiten allgemeiner Genauigkeitsaussagen und sensorspezifischen Merkmalen, die bei der Auswahl der Sensoren für die praktische Anwendung von Bedeutung sein können. Letztlich haben genau diese sehr praxisbezogenen Fragestellungen zur Einrichtung des Projekts geführt. Die Systeme sollen möglichst umfassend und auf breiter wissenschaftlicher Basis analysiert werden. Dazu wurden die verschiedenen Arbeitspakete formuliert und ein offenes Expertennetzwerk aus Forschung aber auch Vertretern von kommerziellen Firmen und den Herstellern gebildet.

Die DGPF-Kameraevaluierung ergänzt bereits gelaufene ähnliche Evaluierungstests, kann aber auch als Vorarbeit für die Entwicklung von neuen Standards und Zertifizierungs- bzw. Validierungsprozessen verstanden werden. Es ist mit Sicherheit davon auszugehen, dass die umfassenden Ergebnisse dieser Auswertung weit über den deutschen Sprachraum hinausstrahlen werden.

Weitere Interessenten können sich auch jetzt noch aktiv in die Auswertungen einbringen. Dazu bitte Kontaktaufnahme mit den Auswerteamleitern oder der Projektleitung. Für Herbst 2009 ist ein größeres Treffen in Stuttgart angesetzt. Termin für die ganztägige Veranstaltung ist Dienstag, 6. Oktober 2009. Da die Untersuchungen im Projekt zu diesem Treffen im Herbst in gewissem Umfang abgeschlossen sein sollten, hat dieser Termin den Charakter eines ersten Abschlusstreffens. Aktuelle Informationen über den Projektfortgang können auch der Projektseite [www.dgpf.de/neu/projekt/DKEP-Allg.html](http://www.dgpf.de/neu/projekt/DKEP-Allg.html) entnommen werden.

## 7 Literatur

- CRAMER, M., 2005: 10 Years ifp test site Vaihingen/Enz – an independent performance study, in Fritsch (ed.): Photogrammetric Week 05, Wichmann Verlag, Karlsruhe, Seiten 79-92.
- CRAMER, M., 2007: The EuroSDR performance test for digital aerial camera systems, in Fritsch (ed.): Photogrammetric Week 07, Wichmann Verlag, Karlsruhe, Seiten 89-106.
- CRAMER, M., 2008a: Evaluierung digitaler photogrammetrischer Luftbildkamerasysteme - Projektstatus April 2008, Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation PFG, Heft 4/2008, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart, Seiten 296-298.
- CRAMER, M., 2008b: Evaluierung digitaler photogrammetrischer Luftbildkamerasysteme - Projektstatus September 2008, Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation PFG, Heft 6/2008, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart, Seiten 525-531.
- DGPF, 2009: DGPF Projekt: Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme, digital verfügbar unter <http://www.dgpf.de/neu/projekt/DKEP-Allg.html>, letzter Zugriff 22. Januar 2009.
- HAALA, N. & WOLFF, K., 2009: Digitale photogrammetrische Luftbildkamerasysteme – Evaluation der automatischen Generierung von Höhenmodellen, dieser Tagungsband 18 / 2009, Jahrestagung DGPF Jena.



- HONKAVAARA, E.; AHOKAS, E.; HYYPPÄ, J.; JAAKKOLA, J.; KARTINEN, H.; KUITTINEN, R.; MARKELIN, L. & NURMINEN, K., 2006: Geometric test field calibration of digital photogrammetric sensors, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Special Issue on Digital Photogrammetric Cameras, 60(6):387-399.
- HONKAVAARA, E.; MARKELIN, L. & ARBIOL, R., 2009: EuroSDR project: Radiometric Aspects of Digital Photogrammetric Images, digital verfügbar unter <http://www.fgi.fi/EuroSDR/> , letzter Zugriff 22. Januar 2009.
- JACOBSEN, K., 2008: Geometrisches Potential und Informationsgehalt von großformatigen digitalen Luftbildkameras, *PFG* 2008, Heft 5, S. 325-336.
- TEMPELMANN, U. & HINSKEN, L., 2007: Hardware improvements of the ADS40 sensor heads SH51/52 and how they allow a better camera model for self calibration, in Grün/Kahmen (eds.): *Proceedings on Optical 3-D Measurement Techniques VIII*, Zürich, Switzerland, Seiten 187-193.

## 8 Anhang

Die nachfolgenden 24 Institutionen haben bisher die Projektvereinbarung vorgelegt und sind aktiv an den Analysen des Datenmaterials beteiligt. Die Hersteller bekommen die Referenzdaten erst nach endgültiger Übergabe ihrer Datensätze an die Projektleitung ausgehändigt, sofern eine unterschriebene Projektvereinbarung vorliegt. In nachfolgender Auflistung sind neben Ansprechpartnern und Auswerteschwerpunkten auch die ausgelieferten Datensätze angegeben.

- Geografisches Institut, Heinrich Heine Universität Düsseldorf, Prof. Dr. E. Jordan (Radiometrie, Landnutzungserhebungen), ausgelieferte Datensätze: DMC, DigiCAM, RMK
- Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, Universität Osnabrück, Prof. Dr. M. Ehlers (Radiometrie, Landnutzungserhebungen), ausgelieferte Datensätze: DigiCAM, DMC, RMK, ADS40, JAS-150, 3K-Kamera
- Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, Leibniz Universität Hannover, Dr. K. Jacobsen (Geometrie), ausgelieferte Datensätze: DigiCAM, ADS40
- Institut für Photogrammetrie und Institut für Raumfahrtssysteme, Universität Stuttgart, Dr. M. von Schönermark (Radiometrie, Spektrometer-/BRDF-Messungen), ausgelieferte Datensätze: DigiCAM, DMC, RMK, ROSIS, AISA, JAS-150
- Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie, Technischen Universität Graz, Dr. V. Kaufmann (Geometrie), ausgelieferte Datensätze: RMK, DigiCAM
- Labor für Photogrammetrie, Technische Fachhochschule Berlin, Prof. Dr. M. Kähler und Prof. M. Breuer (Geometrie, Höhenmodelle, Stereoplotting), ausgelieferte Datensätze: DigiCAM, DMC
- Institut für Geowissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Prof. Dr. C. Gläßer und Dr. A. Jung (Radiometrie, Spektrometermessungen)
- Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, ETH Zürich, Prof. Dr. A. Grün und Dr. M. Baltsavias (Geometrie, Radiometrie, Höhenmodelle), ausgelieferte Datensätze: 3K-Kamera, DMC, ALS50, JAS-150, ADS40, Ultracam-X

- Institut für angewandte Photogrammetrie und Geoinformation, FH Oldenburg, Prof. Dr. T. Luhmann (Geometrie)
- INSA Strasbourg, Graduate School of Science and Technology, Prof. Dr. P. Grussenmeyer (Geometrie, Höhenmodelle)
- Bundesamt für Geodäsie und Kartographie, Frankfurt/M., Dr. A. Busch (Geometrie), ausgelieferte Datensätze: ADS40, DMC, ALS50
- Amt für Geoinformation, Vermessung- und Katasterwesen Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin, S. Baltrusch (Geometrie, Höhenmodelle), ausgelieferte Datensätze: RMK, DigiCAM, DMC, Ultracam-X
- Landesamt für Vermessung und Geoinformation, München, W. Stöbel (Geometrie, Radiometrie), ausgelieferte Datensätze: RMK, DMC, ADS40, Ultracam-X
- Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf, H. Hastedt (Radiometrie, Landnutzungsklassifizierungen, Höhenmodelle, Stereoplotting), ausgelieferte Datensätze: ADS40, DigiCAM, DMC, JAS-150
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen, S. Holzwarth und Dr. F. Kurz (Geometrie, Radiometrie), ausgelieferte Datensätze: ALS50, Passpunkte
- EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH, Münster, C. Lücke (Radiometrie, Landnutzungsklassifizierung)
- aphos Leipzig, Dr. Schulz (Geometrie, Stereoplotting)
- C+B Technik Markgröningen, Dr. E. Wild (Stereoplotting), ausgelieferte Datensätze: RMK, DigiCAM, DMC, ALS50
- Geosystems GmbH, Germering/Berlin, R. Schneider (Höhenmodelle), ausgelieferte Datensätze: ADS40, DMC, ALS50, Ultracam-X
- RAG Aktiengesellschaft, Herne, V. Spreckels (Geometrie, Radiometrie, Höhenmodelle, Stereoplotting), ausgelieferte Datensätze: JAS-150, ADS40, DigiCAM, DMC, RMK, Ultracam-X, ALS50
- Intergraph Z/I Imaging Ltd, Aalen, C. Dörstel und K. Neumann (Vergleichsauswertung Hersteller)
- Trimble Holdings GmbH, Metric Imaging Dpt., Braunschweig, T. Tölg (Vergleichsauswertung Hersteller)
- Vexcel Imaging GmbH, Graz, Dr. M. Gruber (Vergleichsauswertung Hersteller), ausgelieferte Datensätze: Ultracam-X, Referenzkoordinaten, ALS50
- IGI mbH, Kreuztal, Dr. J. Kremer (Vergleichsauswertung Hersteller), ausgelieferte Datensätze: DigiCAM, Referenzkoordinaten



# Digitale photogrammetrische Luftbildkamerasysteme - Evaluation der automatischen Generierung von Höhenmodellen

NORBERT HAALA<sup>1</sup> & KIRSTEN WOLFF<sup>2</sup>

*Zusammenfassung: Im Rahmen des DGPF-Projekts zur Evaluierung digitaler Kamerasysteme beschäftigt sich das Auswerteteam Höhenmodelle mit den Genauigkeitsuntersuchungen zur automatischen bildbasierten Erzeugung von Höhendaten. Im Artikel werden die verfügbaren Daten und Projektparameter sowie das Untersuchungskonzept vorgestellt. Aufgrund des noch laufenden Projektes ist eine vergleichende Untersuchung der eingesetzten Systeme noch nicht möglich. Die präsentierten ersten Ergebnisse dokumentieren jedoch die erheblich gesteigerte Genauigkeit und Zuverlässigkeit der automatischen, bildbasierten Erzeugung von Höhendaten, die in den aktuellen Entwicklungen im Bereich der digitalen Luftbildkameras und der photogrammetrischen Auswertesysteme begründet sind.*

## 1 Einleitung

Ein wichtiger Vorteil digitaler photogrammetrischer Luftbildkamerasysteme gegenüber gescanntem Filmmaterial ist die Vergrößerung des Dynamikbereichs und das verbesserte Signal-Rauschverhältnisses der so erfassten Bilddaten. Dadurch wird eine erheblich gesteigerte Genauigkeit und Zuverlässigkeit der automatischen Bildzuordnung möglich. Diese Verfahren liefern die grundlegenden Beobachtungen für die Blockausgleichung und die bildbasierte Generierung von Höhenmodellen. Damit ist ein erheblicher Qualitätssprung bei diesen Auswerteprozessen aufgrund dieser Entwicklungen zu erwarten. Eine zusätzliche Stützung der photogrammetrischen Auswertung während der automatisierten Aerotriangulation, Höhenmodellgenerierung oder Objektextraktion ist darüber hinaus durch die Nutzung stark überlappender und damit hochredundanter Bilddaten zu erwarten. Diese werden ebenfalls mit digitalen photogrammetrischen Luftbildkamerasystemen mit vergleichsweise geringem Mehraufwand erfasst. Die zunehmende Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger Bilddaten von digitalen photogrammetrischen Luftbildkamerasystemen hat mittlerweile auch zu einer Wiederbelebung der Entwicklung von Bildzuordnungsalgorithmen geführt. Beispiele hierfür sind die Softwaresysteme Next Generation Automatic Terrain Extraction (NGATE) von BAE Systems [DEVENECIA, et. al, 2007] oder MATCH-T DSM der INPHO GmbH [LEMAIRE, 2008] und SATellite image Precision Processing (SAT-PP) der ETH Zürich [ZHANG & GRUEN, 2004]. Ein wichtiges Ziel dieser Entwicklungen ist unter anderem die potentielle Nutzung von Mehrfachüberdeckungen für die dichte Erzeugung von 3D Daten, um so das Genauigkeitspotential der Bildauswertung für die automatische DGM-Generierung zu steigern.

---

<sup>1</sup> Norbert Haala, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24D, 70174 Stuttgart; E-Mail: Norbert.Haala@ifp.uni-stuttgart.de

<sup>2</sup> Kirsten Wolff, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, ETH Hönggerberg, 8093 Zürich; E-mail: wolff@geod.baug.ethz.ch

Der vorliegende Beitrag soll den Stand und das Potential der aktuellen Entwicklungen im Hard- und Softwarebereich für die automatische, bildbasierte Erzeugung von Höhendaten dokumentieren. Die zugrunde liegenden Untersuchungen wurden dabei innerhalb der Arbeitsgruppe *Höhenmodelle* des DGPF-Projekts *Evaluierung digitaler Kamerasysteme* durchgeführt. Generell sollen innerhalb dieses Projekts die Auswertungen durch die Beteiligung verschiedener Anwender, Systemhersteller und Forschungseinrichtungen auf eine möglichst breite und unabhängige Basis gestellt werden. Derzeit sind diese Arbeiten noch nicht abgeschlossen, eine umfassende Diskussion und Bewertung von system- oder auswertespezifischen Merkmalen ist demnach im vorliegenden Beitrag nicht möglich. Die vorgestellten Untersuchungen und ersten Ergebnisse der Autoren zeigen jedoch schon zum jetzigen Zeitpunkt das große Potential aktueller Systeme und die wieder stark wachsende Bedeutung der bildbasierten Erfassung von Höhendaten.

## 2 Verfügbare Daten

Die Parameter der untersuchten Kamerasysteme und die Konfigurationen der durchgeführten Bildflüge sind in [CRAMER et al., 2009] ausführlich dokumentiert. Für die bildbasierten Erfassung von Höhendaten war die Verfügbarkeit unterschiedlicher Bodenauflösungen (ground sampling distance [GSD]) und Überdeckungen von Interesse, da so beispielsweise der Nutzen großer Überdeckungen für die automatische Höhenmodellgenerierung untersucht werden kann. Somit wurden sowohl Bildblöcke mit nominell 20cm GSD und 60% Längs- und Querüberdeckung als auch Flüge mit GSD 8cm und 80% Längs- und 60% Querüberdeckung erfasst. Um das dabei entstehende Datenvolumen zu begrenzen und somit die Handhabung der Daten zu erleichtern, wurden die Befliegungen mit nomineller GSD von 8cm und großer Überdeckung auf das zentrale Gebiet des Testfelds beschränkt und die Untersuchungen der Arbeitsgruppe *Höhenmodelle* auf diesen Bereich begrenzt. In diesem zentralen Bereich wurden während der Messkampagne für das DGPF-Projekt im Sommer 2008 auch LiDAR-Daten erfasst. Die Befliegung erfolgte mit einem ALS50 System in insgesamt 10 Fluglinien bei 45°FOV und einer Punktdichte von 5 Punkten/m<sup>2</sup>. Neben der so gemessenen 3D Punktwolke wurde den Mitgliedern der Arbeitsgruppe ein daraus abgeleitetes Digitales Oberflächenmodell mit 25cm Rasterweite zur Verfügung gestellt, um bei Bedarf einen vereinfachten Zugriff auf LiDAR-Höhenwerte zu ermöglichen.

Das Testgebiet mit dem verfügbaren Referenz-DOM sowie markierten Untersuchungsbereichen ist in Abb. 11 dargestellt. Diese Unterteilung in Bereiche wie Steinbruch, Sportplatz, Feld, oder bebautes Gebiet wurde definiert, um die Qualität der bildbasiert erzeugten Höhenmodelle gegebenenfalls getrennt für unterschiedliche Bildtextur und Gelände- bzw. Oberflächentopographien untersuchen zu können. Generell ist eine Hauptschwierigkeit bei Untersuchungen zur bildbasierten Erzeugung von Höhendaten, dass deren Qualität durch unterschiedliche teilweise nur schwer trennbare Faktoren beeinflusst wird. Solche Faktoren sind die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Bildzuordnung, die sowohl vom Zuordnungsalgorithmus als auch vom Bildinhalt abhängt, die eingesetzten Interpolations- und Filteralgorithmen sowie die Qualität der rekonstruierten Bildgeometrie.



Abb. 1: Testgebiet mit verfügbarem Referenz-DOM und markierten Untersuchungsbereichen

Die geometrische Genauigkeit der erfassten Bilddaten und die optimale Handhabung von Blockausgleichungen wird im Rahmen des DGPF-Projekts *Evaluierung digitaler Kamerasysteme* gesondert untersucht, so dass für die Evaluierung der Höhenmodellgenerierung auf eine „optimale“ Orientierung je Bildblock zurückgegriffen werden kann. Die gemeinsame Nutzung einer solchen Referenz-Orientierung durch alle beteiligten Gruppen erleichtert darüber hinaus auch die Vergleichbarkeit der aus den Bilddaten abgeleiteten Höhenmodelle. Probleme können sich jedoch aufgrund fehlender standardisierter Schnittstellen ergeben, die für eine Einbindung von „optimalen“ Blockausgleichungen in die DHM-Generierung notwendig wären. Die Übergabe von Korrekturgittern oder zusätzlichen Parametern der Selbstkalibrierung ist somit in der Praxis häufig nicht problemlos möglich. Aus diesem Grund wurde zur Bestimmung der Referenz-Orientierung zunächst eine Aerotriangulation mit Zusatzparametern bestimmt, um darauf aufbauend in einem zweiten Schritt eine Aerotriangulation ohne Zusatzparameter zu berechnen. In diesem zweiten Schritt werden als Beobachtungen modifizierte Bildkoordinaten verwendet, die um den Einfluss der zunächst geschätzten Zusatzparameter korrigiert wurden. Die sich so ergebenden Orientierungsparameter beinhalten damit implizit eine Selbstkalibrierung, ohne dass eine explizite Übergabe der geschätzten Parameter notwendig wäre. Details des Verfahrens sowie die dabei erreichten Genauigkeiten sind in [CRAMER et al., 2009] dokumentiert.

### 3 Erste Untersuchungen

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Artikels standen von den untersuchten Kamerasystemen DMC, DigiCAM quattro, Ultracam-X, ADS 40 2nd, JAS-150, DLR 3K-Kamera, AIC und RMK-Top15 lediglich Referenzorientierungen für die beiden erstgenannten Systeme zur Verfügung. Aufgrund einer potentiellen Beeinträchtigung der Bilder der DigiCAM quattro durch die Defokussierung eines Kamerakopfes wurden für die ersten Genauigkeitsanalysen vor allem die DMC-Datensätze genutzt. Da diese Analysen noch nicht abgeschlossen sind, müssen diese derzeit jedoch noch als vorläufig betrachtet werden, darüber hinaus werden an dieser Stelle auch keine Genauigkeitsanalysen durchgeführt.

#### 3.1 Höhenvergleich an signalisierten Punkten

Für eine erste qualitative Einschätzung der bildbasiert erfassten Höhendaten wurden zunächst die hochgenauen Koordinaten der im Testgebiet verfügbaren signalisierten Passpunkte genutzt. Abb. 2 zeigt beispielhaft einen DOM-Ausschnitt mit den darin verfügbaren Passpunkten, die in der Regel auf asphaltierten Flächen signalisiert wurden. Das in Abb. 2 dargestellte DOM wurde aus den DMC-Daten mit 8cm GSD durch das Programmsystem MATCH-T DSM abgeleitet.

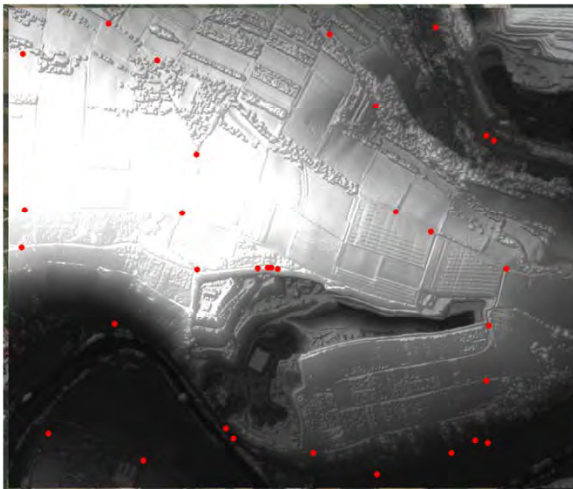


Abb. 2: Berechneter DOM-Ausschnitt mit verfügbaren Passpunkten

An den im Ausschnitt verfügbaren 32 Punkten ergaben sich Differenzen zwischen den GPS-Referenzmessungen und dem DOM mit einer Standardabweichung von 7.9cm, wobei der Maximalfehler bei 39cm lag. Wird dieser Punkt aus der Berechnung der Standardabweichung eliminiert, reduziert diese sich auf einen Wert von 3.5cm. Im Vergleich dazu ergeben die Differenzen zwischen den GPS-Referenzmessungen und dem aus der LiDAR-Punktwolke interpolierten DOM eine Standardabweichung von 2.75cm.

### 3.2 Erzeugung und Nutzung von 3D Punktwolken

Moderne photogrammetrische Auswertesysteme erzeugen neben den traditionellen 2.5D Rasterdarstellung zur Repräsentation der erfassten (Gelände-)Oberflächen auch 3D Punktwolken als optionales Ausgabeprodukt. Solche 3D Repräsentationen sind unter anderem dann von Vorteil, wenn in weiteren Auswerteschritten eine 3D Objektrekonstruktion angestrebt wird. Im Rahmen der hier vorgestellten Genauigkeitsanalysen erlauben sie es zudem, diese Untersuchungen unbeeinträchtigt von etwaigen Interpolationsverfahren durchzuführen. Eine solche Punktwolke, die ebenfalls mit dem Programm MATCH-T DSM aus der DMC-Befliegung mit 8cm GSD abgeleitet wurde, ist in Abb. 3. (links) dargestellt. Bei dem gewählten Ausschnitt handelt es sich um den in Abb. 3. (rechts) abgebildeten Steinbruch, der wie bereits diskutiert als eines der weiter zu untersuchenden Testgebiete festgelegt wurde.

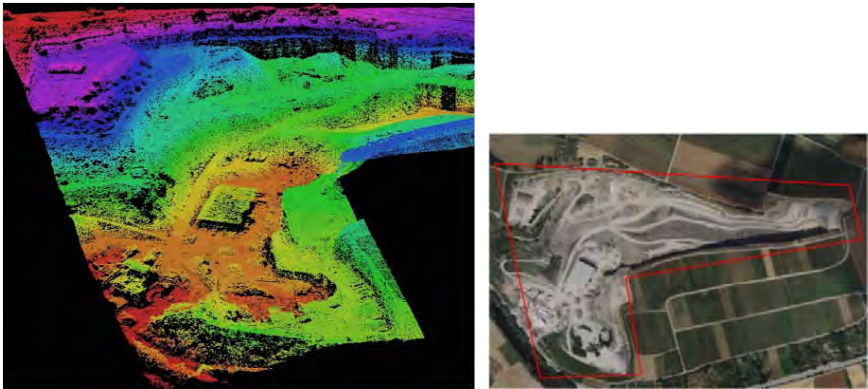


Abb. 3: Durch Bildzuordnung generierte 3D Punktwolke mit zugehörigem Bildausschnitt.

Bei diesem Beispiel handelt es sich aufgrund der Steilheit des Geländes und der teilweise geringen Oberflächentexturen sowohl bezüglich der Topographie als auch der Radiometrie um einen relativ schwierigen Bereich. Die in Abb. 3 dargestellte 3D Punktwolke gibt dennoch die Geometrie der abgebildeten Oberflächen in einer Qualität und Detailliertheit wieder, wie dies lange Zeit nur mittels LiDAR-Datenerfassung möglich war.

### 3.3 Genauigkeitsvergleich für ebenes Gelände

Für weitere Genauigkeitsabschätzungen wurden 3D Punktwolken für unterschiedliche Bilddaten im Bereich eines (ebenen) Sportplatzes berechnet. Abb. 5 zeigt die Resultate für die Aufnahmen der DMC mit 8cm GSD (Abb. 4 a) beziehungsweise 20cm GSD (Abb. 4 b) sowie der DigiCAM quattro mit 20cm GSD (Abb. 4 c) und der RMK mit 8cm GSD (Abb. 4 d). Zum Vergleich ist die LiDAR-Punktwolke in Abb. 6 ebenfalls dargestellt. Die höhenabhängige, farbliche Darstellung der Punkte entspricht jeweils der in diesem Bereich abgebildeten Legende. Das zur Berechnung dieser Punkte verwendete Programmsystem MATCH-T DSM basiert auf einer dichten Zuordnung und anschließende Auswahl von unregelmäßig verteilten Interestpunkten [LEMAIRE, 2008]. Bei dem untersuchten Sportplatz handelt es sich um einen Bereich mit relativ gleich bleibender



Bildtextur, so dass eine relativ homogene Punktverteilung erzeugt wird. Dies gilt nicht für den unteren Bereich der DMC-Bilder, da dort die Bildzuordnung durch den Schlagschatten eines Baumes erschwert wird, der sich aufgrund der Änderung des Sonnenstands relativ zur Oberfläche bewegt. Als Hintergrund für Abb. 5d) wurde ein existierendes Orthophoto verwendet, das somit nicht die tatsächliche Aufnahmesituation wiedergibt. Aus diesem Grund ist in Abb. 5 ein Bildausschnitt des tatsächlich verwendeten Flug DMC 8cm GSD dargestellt.

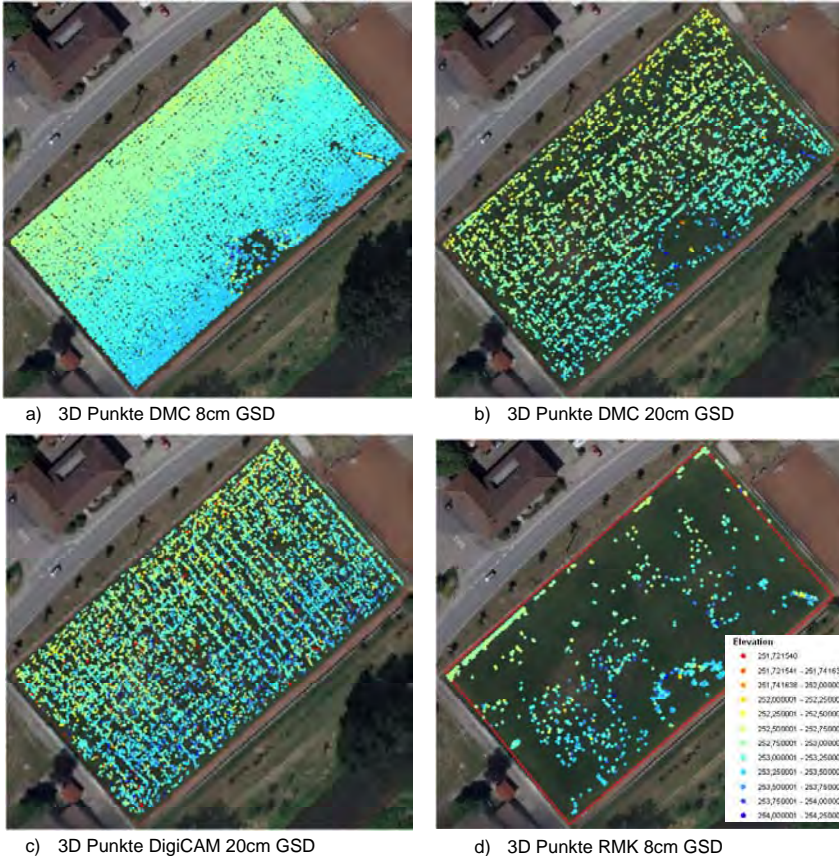


Abb. 4: Durch Bildzuordnung erzeugte 3D Punktwolken für den Bereich Sportplatz.



Abb. 5: Verwendetes DMC-Bild im Bereich Sportplatz



Abb. 6: Referenzpunkt Wolke LiDAR

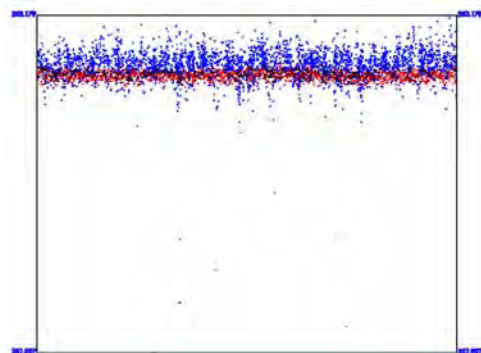


Abb. 7: Profil für 3D Punkt aus LiDAR (rot) und DMC 8cm GSD (blau).

Im Vergleich zu den in Abb. 6 dargestellten LiDAR-Daten zeigen die bildbasiert erzeugten Punktwolken ein größeres Rauschen bei geringerer Punktdichte. Dennoch wird deutlich, dass sich insbesondere die Ergebnisse der Bildzuordnung für den 8cm DMC-Block in Qualitätsbereichen bewegt, die lange Zeit ausschließlich LiDAR-basierten Messverfahren vorbehalten waren. Dieser Fortschritt zeigt sich insbesondere im Vergleich zwischen den Zuordnungsergebnissen in Abb. 5c), die Aufnahmen digitaler photogrammetrischer Systeme nutzen und dem nahezu unbrauchbaren Ergebnis in Abb. 5 das 3D

Punkte abgeleitet aus den RMK-Aufnahmen mit 8cm darstellt.

Den Vergleich eines Profils aus LiDAR (rot) und DMC 8cm GSD Punktdaten (blau) zeigt Abb. 7. Die Daten basieren auf den in Abb. 4a) bzw. Abb. 6 dargestellten 3D Punktwolken. Das größere Rauschen und das Auftreten grober Fehler bei der Bildzuordnung im Vergleich zur LiDAR Messung ist deutlich sichtbar. Gleichzeitig lässt die Punktdarstellung aber auch erkennen, dass durch geeignete Filter und Interpolationsalgorithmen qualitativ gute Oberflächenmodelle daraus abgeleitet werden können.

### 3.4 Visuelle Evaluierung in einem Stadtgebiet

Um eine erste Analyse des Potentials der digitalen Sensoren für die Oberflächengenerierung in bebauten Gebieten durchführen zu können, wurde ein Bereich mit unterschiedlicher Bebauungsart und -dichte gewählt. Die grundsätzlichen Möglichkeiten der DMC Bilddaten mit einer GSD von 8cm und 20cm und einer 6-fach Überlappung sollen hier zunächst nur anhand eines visuellen Vergleichs aufgezeigt werden. Durch eine schattierte Repräsentation eines interpolierten DOMs wird dabei die Qualität der Modellierung feiner Strukturen deutlich sichtbar. Für die Rasterweite der DOMs wurde in etwa die dreifache GSD gewählt, also in diesem Fall 25cm und 60cm. Diese sehr hohe Rasterweite entspricht nicht unbedingt vielen realen Anwendungsfällen, zeigt jedoch die grundsätzlichen Möglichkeiten der Sensoren. Eine spätere Ausweitung auf andere Rasterweiten ist geplant. Für die Generierung der Oberflächenmodelle wurde das Softwarepaket SAT-PP eingesetzt. Dafür wurden die Bilder zunächst von 12bit auf 8bit reduziert. Danach wurden ein adaptiver Glättungsfilter und der texturverstärkende Wallis Filter auf die Bilder angewendet, um sie für die Merkmalsextraktion zu optimieren. Die generierten DOMs wurden nicht manuell nachbearbeitet.

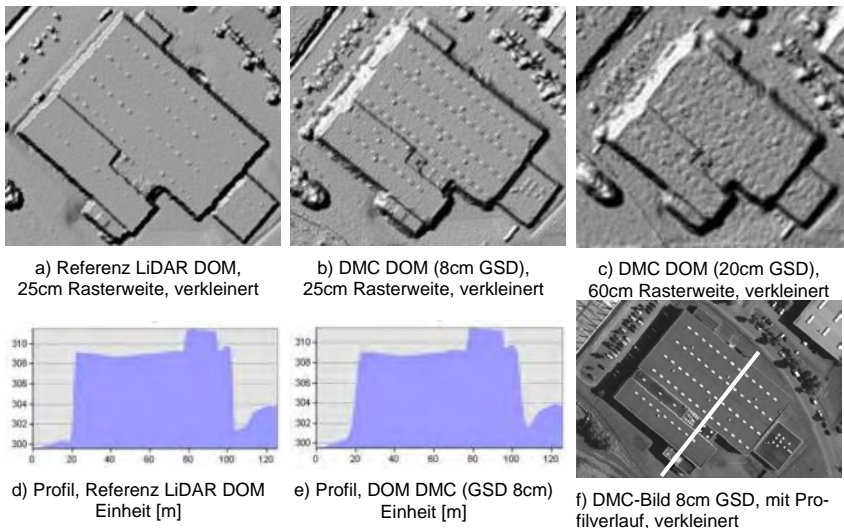


Abb. 8: Visueller Vergleich der Referenzdaten, des DMC (8cm GSD) DOMs, des DMC (20cm GSD) DOMs eines großen Gebäudes mit einer Längenausdehnung in NW – SO Richtung von ca. 115m.

Abb. 8 zeigt für den visuellen Vergleich die DOMs für ein 115m langes Gebäude des Referenzdatensatzes und des DMC DOM 8cm GSD zusammen mit jeweils einem Profil, sowie das DMC DOM 20cm GSD. Die schattierten Darstellungen der DMC DOMs zeigen generell eine gute Qualität und eine hohe Auflösung der Modelle. Die Oberflächen der Referenzdaten zeigen im Allgemeinen eine glattere Struktur. Dem gegenüber enthalten die DMC DOMs 8cm GSD in einigen Bereichen mehr Details, wie zum Beispiel kleine Strukturen auf dem Dach des Gebäudes. Dies ist dadurch erklärbar, dass das 25cm Referenz DOM aus einer Laserpunktwolke mit 5

Punkten/m<sup>2</sup> abgeleitet worden ist und so diese kleinen Strukturen nicht erfasst werden konnten. Deutliche Unterschiede in den Modellen sind durch parkende Autos verursacht worden. Dies gilt es bei einer späteren quantitativen Analyse zu berücksichtigen. Ein Vergleich der Profile des Referenz DOMs, Abb. 8 d) und des DMC DOMs 8cm GSD, Abb. 8 e) unterstreichen das Potential der DMC Daten für diese Anwendung. Das Profil zeigt deutlich die Struktur des Gebäudes mit relativ scharfen Kanten und unterstreicht auch hier, dass wir uns mit den modernen digitalen Kameras dem Qualitätsbereich von LiDAR Daten annähern. Die schattierte Darstellung des Oberflächenmodells, generiert aus den 20cm GSD Bildern, zeigt ein größeres Rauschen in Form von Unebenheiten in der generierten Oberfläche als bei der kleineren GSD und erwartungsgemäß weniger scharfe Kanten.

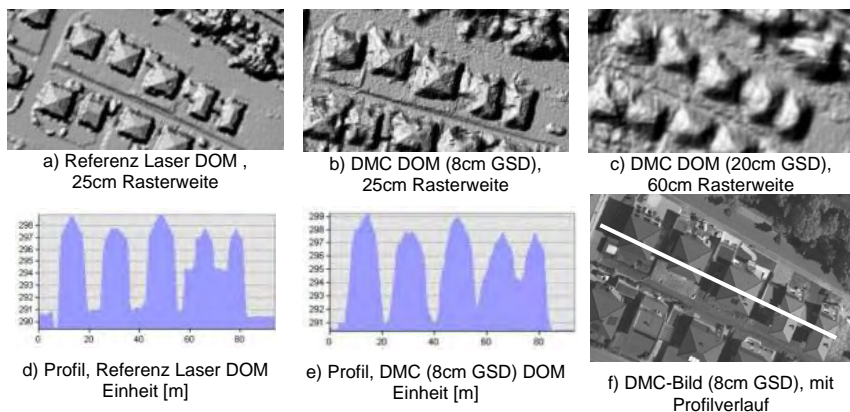
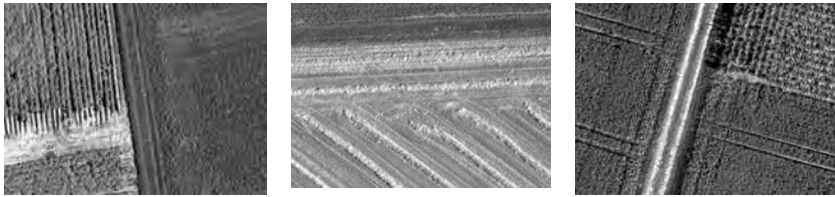


Abb. 9: Visueller Vergleich der Referenzdaten, des DMC (8cm GSD) DOMs, des DMC (20cm GSD) DOMs einer Häuserreihe mit einer Hausbreite zwischen 7m und 12m.

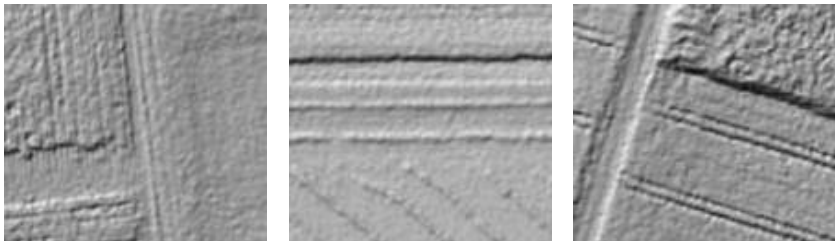
Abb. 9 zeigt die entsprechenden Vergleichsdaten für ein Wohngebiet mit kleineren Gebäuden mit einer Breite von 7m bis 12m und dichterem Bebauung. Auch hier sind die markanten Dachstrukturen in dem DMC DOM (8cm GSD) zu erkennen, die im DMC DOM (20cm GSD) weniger markant modelliert worden sind.

### 3.5 Beispiel Ackerbau

Abb. 10 zeigt DMC Originalbilder und schattierte Darstellungen der generierten Oberflächenmodelle für verschiedene Feldnutzungen und -bestellungen. Diese Gebiete eignen sich aufgrund der Zeitunterschiede zwischen der Laserbefliegung und der Akquisition der optischen Bilddaten nicht für eine quantitative Genauigkeitsuntersuchung. Jedoch wird auch hier die hohe Qualität der Modellierung feiner Strukturen unterstrichen.



DMC Originalbilder der drei Ackergebiete (GSD 8cm, verkleinert).



DMC (GSD 8cm) DOM , Rasterweite 25 cm, original Maßstab.

Abb. 10: Beispiele für rekonstruierte Ackergebiete.

## 4 Diskussion

Nach Meinung der Autoren geben die vorgestellten ersten Ergebnisse der Arbeitsgruppe *Höhenmodelle* des DGPF-Projekts *Evaluierung digitaler Kamerasysteme* einen klaren Hinweis auf den derzeit stattfindenden großen Entwicklungssprung bei der automatischen bildbasierten Generierung von Höhenmodellen. Sie bestätigen damit die Bedeutung und Relevanz des DGPF-Projekts für den Bereich der digitalen Photogrammetrie. Die bisherige große Resonanz und breite Beteiligung an diesem empirischen Praxistest lässt sehr interessante Ergebnisse in der weiteren Bearbeitung erwarten.

## 5 Literaturverzeichnis

- CRAMER, M.; KRAUß, H.; JACOBSEN, K.; VON SCHÖNERKARK, M.; HAALA, N. & SPRECKELS, V., 2009: Das DGPF-Projekt zur Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme, dieser Tagungsband.
- DEVENECIA, K.; WALKER, S. & ZHANG, B., 2007: New Approaches to Generating and Processing High Resolution Elevation Data with Imagery. *Photogrammetric Week*, **17** (5), S. 1442-1448.
- LEMAIRE, C., 2008: Aspects of the DSM Production with High Resolution Images IAPRS, Volume XXXVII, Part B4, S. 1143-1146.
- ZHANG, L. & GRUEN, A., 2004: Automatic DSM Generation from Linear Array Imagery Data. *IAPRS*, **35** (B3), S. 128-133.

# E-Learning Angebote und ihre Qualität

CHRISTIANE KATTERFELD<sup>1</sup> & GERHARD KÖNIG<sup>2</sup>

*Zusammenfassung: E-Learning hat seit einer reichlichen Dekade seinen festen Platz im Bereich der Aus- und Weiterbildung in der Photogrammetrie, Fernerkundung und GIS. Der „e-Hype“ ist vorüber, die Euphorie der Ernüchterung gewichen und die Anstrengungen gehen dahin, reife E-Learning-Produkte zu entwickeln. Die Frage, wodurch sich „reifes“ E-Learning auszeichnet setzt die Bestandsaufnahme bestehender Produkte voraus und schließt nach vorheriger Auseinandersetzung mit dem Qualitätsbegriff ihre Bewertung ein. Im Rahmen einer Studie im Auftrag der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung (ISPRS) wurden 30 Produkte anhand von 42 Kriterien zur Qualität bewertet, welche durch eine Expertenbefragung validiert werden konnten. Aus dem durch die Evaluierung gewonnenen Eindruck können für die Zukunft Richtlinien für die Qualitätssicherung abgeleitet und Herausforderungen für das E-Learning in der Zukunft identifiziert werden.*

## 1 Qualität von E-Learning

In der Qualitätsdebatte wird zwischen zwei Formen der Qualität im Zusammenhang mit E-Learning unterschieden. Das ist einerseits die Entwicklung von Qualität für das E-Learning selbst und zum anderen die Verbesserung der Qualität durch das E-Learning. Im Rahmen der Studie ging es v.a. um die erste Form. Schließlich ist sie auch Voraussetzung für den zweitgenannten Aspekt.

DONABEDIAN (1980) hat schon 1980 eine ‚Qualitäts-Triade‘ für Ausbildungsprozesse identifiziert, die später auf das E-Learning übertragen wurde. Diese beinhaltet die Betrachtung

- der Voraussetzungen (input or structure quality),
- des Lernprozesses (process quality) sowie
- des Ergebnisses (output/ outcome quality).

Die Input-/ Strukturqualität umfasst Punkte, wie Verfügbarkeit und technische Infrastruktur (external structure) genauso wie die Voraussetzungen, die ein Lernender mitbringt (internal structure).

Die Prozessqualität hingegen ist sehr schwer zu fassen und zu bewerten. Zu undurchschaubar sind noch die Wechselwirkungen einzelner Lernprozesse, sowie deren Wirkung auf unterschiedliche Voraussetzungen der Lernenden. Zum derzeitigen Zeitpunkt kann die Bewertung der Prozessqualität am besten durch Kriterien wie Interaktion des Lernalers, Lernformate, Lernkultur, Lerninhalte oder Lernziele angenähert werden.

1) Christiane Katterfeld, ehem. Wiss. Mitarbeiterin am Institut für Kartographie und Geoinformatik, Leibniz Universität Hannover, Appelstr. 9a, 30167 Hannover, [christiane.katterfeld@web.de](mailto:christiane.katterfeld@web.de)

2) Gerhard König, Wiss. Mitarbeiter am Fachgebiet Methodik der Geoinformationstechnik der TU Berlin, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin, [Gerhard.Koenig@TU-Berlin.DE](mailto:Gerhard.Koenig@TU-Berlin.DE)



Die Ergebnisqualität liefert möglicherweise die besten Indizien für die Qualität eines Lernproduktes, denn unabhängig von den eingesetzten Mitteln (und zugrunde liegenden Theorien) entscheidet der Erfolg über die Qualität. Allerdings ist es aufwendig, die Ergebnisse zu messen und zu vergleichen. Komplexe Nutzerszenarien müssten erstellt und aufwendige umfangreiche empirische Tests durchgeführt werden.

Im Rahmen der ISPRS-Studie war diese Forschung nicht möglich. Daher muss sich ein Qualitätsmodell in der vorzustellenden Studie auf Faktoren, die den ersten beiden Ebenen der Triade zuzuordnen sind, also Voraussetzungen und Lernprozess-Qualität, konzentrieren.

Die Lern-Voraussetzungen werden von folgenden Kategorien beeinflusst:

- Technologie,
- Software Ergonomie,
- Organisatorisches und
- Ökonomische Aspekte sowie
- Kontext des Lernenden / Nutzer-Orientierung.

Aspekte, die den Lernprozess direkter beeinflussen sind:

- Inhalt und
- Didaktik/ Pädagogik.

Für die detaillierte Auseinandersetzung mit den einzelnen Kategorien ist an dieser Stelle nicht ausreichend Raum. KATTERFELD & KÖNIG (2008a, 2008b) geben tieferen Einblick in Bedeutung der einzelnen Qualitätsaspekte und begründen die Herleitung der konkreten Kriterien.

## **2 Die Kriterien-Checkliste**

KATTERFELD & KÖNIG (2008b) geben einen detaillierten Überblick über mögliche Methoden zur Qualitätssicherung von Ausbildungsangeboten, insbesondere E-Learning Produkten. Zu diesen zählen neben den Methoden des Qualitätsmanagement und der Evaluation (im engeren Sinne) im Bereich der Qualitätsbewertung beispielsweise die Durchführung von Benchmarks oder Audits Begutachtungen mit dem Ziel der Akkreditierung und Zertifizierung bzw. die Vergabe von Qualitätssiegel. Eine weitere Methode ist die der Kriterien-basierten Bewertung. Dabei werden Qualitätsideale in Einzelkriterien übersetzt, hinsichtlich welcher die Lernprodukte auf ihre Existenz bzw. Ausprägung untersucht werden. Natürlich kann sowohl bei der Auswahl, wie auch bei der Bewertung der Kriterien ein gewisser Grad an Subjektivität nicht ausgeschlossen werden. Dennoch bietet dieses Verfahren die Möglichkeit, umfangreiche Grundgesamtheiten relativ schnell zu bewerten. Zudem sind Ergebnisse vergleichbar und die Bewertung nachvollziehbar.

Entsprechend den oben vorgestellten Kategorien wurden insgesamt 42 Kriterien in einer Checkliste zusammengestellt (vgl. Tabelle 1), deren Charakterisierung ein repräsentatives Bild von der Qualität eines E-Learning-Produktes gibt.

Kategorie	Kriterien	Beschreibung
Inhalt	Richtigkeit	Ist der Inhalt richtig
	Vollständigkeit	Ist der Inhalt vollständig
	Relevanz des genutzten Materials	Ist das verwendete Material relevant für das Thema (u. vice versa)
	Darstellung in einem weiteren Umfeld / Motivation	Wurde das Thema umfassend (d.h. in weiterem Kontext) präsentiert, auch um den Lerner für das Thema zu motivieren
	Angemessenheit des Materials	Illustriert das Material das Thema in sinnvoller Weise
	Zusammenstellung und Organisation	Ist der Inhalt und das Material sinnvoll und verständlich geordnet
	Qualifikation des Autors	Sind die Autoren und Tutores (im Hinblick auf den Inhalt) angemessen qualifiziert
Didaktik	Definition von Lernzielen	Ist das Lernziel definiert
	Definition, wie Lernziele erreicht werden sollen	Ist definiert wie das Lernziel erreicht werden soll
	Didaktisches Konzept	Ist ein (gehobenes) didaktisches Konzept erkennbar (z. B. Entsprechend der konstruktivistischen Theorie)
	Interaktionsmöglichkeiten	Sind fortgeschrittene Funktionalitäten zur Interaktion (nicht nur Navigation !) verfügbar
	Übungen / Tests	Sind Übungen und Tests (in sinnvoller Weise) vorhanden
	Bewertungen	Gibt es eine Bewertung zu den Übungen und Tests
	Individuelle Unterstützung der Lernenden	Ist eine individuelle Unterstützung des Lerners sichergestellt (z.B. durch Möglichkeiten für (regelmäßigen) Kontakt oder individuelle Bewertung)
	Möglichkeit zur Kommunikation	Ist Kommunikation zum Tutor und zu anderen Lernenden ermöglicht
	Instruktionsdesign	Sind sinnvolle Instruktionen zur Nutzung des Materials und zur Bearbeitung der Übungen gegeben
Kontext des Lernenden	Qualifikation des Lehrenden / Tutors	Sind die Tutores (im Hinblick auf die Didaktik) angemessen qualifiziert
	Kontext des Lernenden	Spielt der Kontext des Lernenden eine Rolle (z.B. Zielgruppe, Lerntyp, Motivation, Vorwissen, Interaktionsvorlieben)
	Möglichkeiten zur Personalisierung/ Adaption	Gibt es Möglichkeiten zur Personalisierung/ Adaption
Organisatorische Aspekte	Einpassung in ein Curriculum	(sofern Studenten die Zielgruppe sind:) ist der Inhalt einem Lehrplan zugeordnet
	Zertifizierung	(im Falle des erfolgreichen Abschluss:) wird ein Zertifikat vergeben
	Wartung	Ist die Wartung sichergestellt
	Qualitätssicherung	Gibt es einen Qualitätssicherungsmechanismus
	Beschreibung durch Metadaten	Gibt es auf technischer, inhaltlicher und organisatorischer Ebene eine Beschreibung durch Metadaten
	Dokumentationen	Ist das Material gut dokumentiert (hinsichtlich der organisatorischen und technischen Aspekte)

Tab. 1: Kriterien zur Bewertung von E-Learning Produkten – Teil I



Kategorie	Kriterien	Beschreibung
Software Ergonomie	Graphisches Design	Unterstützt das graphische Design die Verständlichkeit und ist generell ansprechend
	Inhaltliche Gestaltung	Trägt die Gestaltung des Inhaltes zur Verständlichkeit bei und ist generell ansprechend
	Nutzerführung	Besteht eine klar verständliche Nutzerführung
	Hilfefunktionen	Sind Hilfefunktion (hinsichtlich Inhalt, Nutzerführung und Technik) vorhanden
Nachhaltigkeit/Ökonomische Aspekte	Kosteneffektivität	Ist die Lernumgebung unter kosten-effektiven Bedingungen entwickelt und betrieben
	Finanzierungsstrategie	Gibt es eine nachhaltige Finanzierungsstrategie
	Nachhaltigkeit	Wurden Maßnahmen zur Sicherung der Nachhaltigkeit unternommen
	Interoperabilität	Ist die Umgebung konform zu Interoperabilitäts-Standards
Technologie	Technische Umsetzung	Ist der technische Aufwand für die Bereitstellung von Funktionalitäten, der seitens Provider und Nutzer betrieben wird, angemessen zum Inhalt und sind die technischen Potentiale effektiv und sinnvoll ausgenutzt
	Anforderungen an die Infrastruktur	Ist die Infrastruktur, die sowohl beim Provider, als auch beim Nutzer bereitstehen muss, handhabbar (=gut) oder zu kompliziert (= schlecht)
	Technische Dokumentation	Wird (sofern notwendig) eine technische Dokumentation bereitgestellt
	Einfachheit	Ist die Umgebung einfach zu nutzen
	Qualität der Assets	Ist die (technische) Qualität der Assets (Bilder, Animationen etc.) gut
	Aktualität	Ist die Umgebung up-to-date
	Verfügbarkeit	Ist die Verfügbarkeit der Umgebung gewährleistet
	Qualifikation des Entwicklers / Designers	Sind die Entwickler/ Designer (im Hinblick auf die Technik) angemessen qualifiziert
Reaktion des Lernenden	Reaktion des Lernenden	Wie fand der Lernende die Umgebung

Tab. 1: Kriterien zur Bewertung von E-Learning Produkten – Teil II

### 3 Durchführung der Studie

Anhand der vorgestellten Kriterien wurden 30 Produkte aus dem Bereich Fernerkundung, Photogrammetrie und GIS evaluiert. Da die Studie im Rahmen der ISPRS durchgeführt wurde, beschränkt sich die Auswahl auf Angebote, die auch oder ausschließlich in englischer Sprache verfügbar sind. Einen Überblick über die getesteten Produkte geben KATTERFELD & KÖNIG (2008b) sowie die Webseite der ISPRS-Working Group VI/2 für E-Learning (<http://www.igg.tu-berlin.de/ISPRS/quality/overview.php>).

Die vorgestellten Ergebnisse basieren auf der Meinung einer kleinen Expertengruppe. Angestrebt ist allerdings eine Erweiterung der Untersuchung. Zu diesem Zweck wurde ein Online-Fragebogen entwickelt und auf der Webseite der ISPRS-Working Group VI/2 für E-Learning (<http://www.igg.tu-berlin.de/ISPRS/quality/questionnaire.php>) veröffentlicht. Aufrufe zur

Teilnahme wurden u.a. über die Arbeitsgemeinschaft der Geodäsiestudierenden (ARGEOS), das International Geodesy Student Meeting (IGSM), die ISPRS sowie im Rahmen der DGPf Ausbildungstagung 2008 in Potsdam gestartet.

## 4 Ergebnisse

Im Rahmen einer Diskussion zur Qualität von E-Learning muss festgestellt werden, dass die Festlegung eines allgemeingültigen Modells sehr schwierig ist. Dies liegt darin begründet, dass es verschiedene Ansprüche an die Qualität solcher Produkte gibt. Die Gründe sind vielschichtig. Beispielsweise lassen sich nach EHLERS (2006) verschiedene Lernertypen unterscheiden. Dies sind der Individualist, der Ergebnis-Orientierte, der Pragmatiker und der Avantgardist. Für jeden Typ beschreibt EHLERS (2006) ein Profil, welches die Eigenschaften hinsichtlich Kommunikationsbedarf, Interaktionsvorlieben, Grad des selbstgesteuerten Lernens etc. beschreibt. Aus dieser Unterscheidung lässt sich ableiten, dass eine Zusammenstellung von Qualitätskriterien, wie sie Kapitel 2 vornimmt, durch jeden Lernertyp unterschiedlich gewichtet werden muss. In KATTERFELD & KÖNIG (2008a) ist im Detail dargelegt, wie die Gewichtung für jeden Lernertyp gestaltet werden kann. Entsprechend wurde bei der online Publikation der Ergebnisse auf der Webseite der ISPRS-Working Group VI/2 für E-Learning ([http://www.igg.tu-berlin.de/ISPRS/quality/advanced\\_eval.php](http://www.igg.tu-berlin.de/ISPRS/quality/advanced_eval.php)) eine von der Sichtweise abhängige Darstellung der Ergebnisse vorgenommen. Je nach Wichtung der Einzelkriterien kann der Einblick unter Berücksichtigung der verschiedenen Schwerpunkte abgerufen werden, nämlich nach

- dem Inhalt (v.a. passend für den Individualisten),
- der Didaktik (v.a. passend für den Pragmatiker),
- dem Ergebnis (v.a. passend für den Ergebnis-Orientierten),
- der Technik (v.a. passend für den Avantgardisten) oder
- der ökonomischen Sichtweise (v.a. passend für all jene, die Lernumgebungen entwickeln, pflegen und einsetzen)

genommen werden.

Setzt man für alle Kriterien eine gleiche Wichtung, also eine neutrale Sichtweise an, so zeigen die Ergebnisse für die getesteten Produkte

- gute bis sehr gute Werte in der Kategorie ‚Inhalt‘,
- durchschnittliche bis gute Werte in der Kategorie ‚Didaktik‘,
- schlechte bis durchschnittliche Werte im Bereich der Beachtung des ‚Learner Context‘,
- heterogene, aber überwiegend gute Werte im Bereich der ‚Organisatorischen Aspekte‘,
- gute Werte im Bereich der Softwareergonomie,
- durchschnittliche Werte im Bereich der Nachhaltigkeit und
- gute bis sehr gute Werte im technischen Bereich.

Die vollständigen Ergebnisse sind auf der Webseite der ISPRS-Working Group VI/2 für E-Learning (<http://www.igg.tu-berlin.de/ISPRS/quality/statistics.php>) publiziert und in KATTERFELD & KÖNIG (2008a) ausführlich dargestellt und diskutiert.

Als eines von konkreten Problemereichen wurde durch vergleichsweise schlechtes Abschneiden von Kriterien aus der Kategorie Didaktik das Fehlen didaktischer Konzepte identifiziert. So erzielten z.B. die Kriterien ‚Hinweis, wie Lernziel erreicht werden soll‘, Vorhandensein und Qualität von Interaktionsmöglichkeiten, Bewertungen und Feedbacktools‘ relativ schlechte Werte. Auch die Beachtung des Lernerkontext‘ ist in den Angeboten weitgehend unbeachtet geblieben. Setzt man eine implizite Ausrichtung auf eine Zielgruppe voraus, so kann auch deren explizite Beschreibung gefordert werden. Wünschenswert wären aber auch Differenzierungen innerhalb von Lernmaterialien (z.B. Hinzufügen/ Weglassen von Teilen – je nach Vorwissen oder Bereitstellung verschiedener Ansätze der Erläuterung oder Übungsmöglichkeiten). Wichtig in diesem Bereich sind zudem Elemente, wie (gezielte) Bewertungsoptionen oder individuelle Unterstützung. Ansätze in diesem Bereich erreichen den Nutzer in seiner individuellen Situation und nützen ihm daher am meisten.

Ein weiterer mangelhafter Punkt ist die Umsetzung, bzw. vorausgehend Etablierung oder Entwicklung von Metadaten- und Interoperabilitätskonzepten. In einigen Fällen sind diese schon vorhanden (z.B. die Verwendung des Metadatenstandards LOM), jedoch fehlt die breite Akzeptanz bzw. Umsetzung.

## 5 Validierung der Anforderungskriterien an E-Learning

In einer anschließenden Untersuchung wurde der in Kapitel 2 vorgestellte Kriterienkatalog validiert, in dem die Anforderungen zur Bewertung von E-Learning Material zusammengefasst sind. Dazu wurden in einer Umfrage Experten gebeten, zunächst die Richtigkeit der Aussagen bzw. Kriterien in einer Skala von 1 (zutreffend bzw. sehr relevant) bis 5 (nicht zutreffend / nicht relevant) einzustufen und anschließend die Relevanz dieser Kriterien für die Umsetzung von ‚gutem E-Learning‘ einzuschätzen.

Der Großteil der Aussagen wird durch die Experten im Durchschnitt als richtig (entsprechend den Bewertungen 1 und 2) bezeichnet. Lediglich die Aussagen

- Es sollte beschrieben sein, wie das Lernziel erreicht werden soll.
- Es sollte Möglichkeiten zur Personalisierung / Adaption geben.
- Es sollte eine Form der Zertifizierung bereitgestellt werden.
- Die Materialien bzw. ihre technische Nutzung sollten in einer Dokumentation beschrieben werden.

wurden im Sinne eines Durchschnittswertes schlechter als 2,5 als weniger zutreffend bewertet.

Mit besonders hoher Priorität (Durchschnittswert 1,5 und besser) wurden von den Experten folgende Kriterien bewertet:

- Der Inhalt sollte richtig und aktuell sein.
- Die genutzten Materialien sollten den Inhalt gut kommunizieren und illustrieren, d.h. sie sollten dem Inhalt angepasst sein.
- Die Materialien sollten sinnvoll angeordnet sein. Die Anordnung sollte das Verständnis unterstützen.
- Die Materialien sollten zur aktiven Handlung anregen.

- Es sollten (sinnvolle) Übungen und Tests bereitgestellt werden.
- Die (inhaltliche sowie technische) Wartung der Materialien sollte sichergestellt sein.
- Das graphische Design sollte zur Verständlichkeit beitragen und generell ansprechend sein.
- Die Nutzerführung sollte klar und logisch sein.
- Die Umgebung sollte so einfach und intuitiv wie möglich zu bedienen sein.
- Die Umgebung sollte zeitlich und räumlich verlässlich verfügbar sein.

Interessant erscheint schließlich die Betrachtung ausgewählter Kriterien, bei denen die Experten sehr unterschiedlicher Meinung waren, d.h. die Bandbreite von 5 möglichen Kategorien (von sehr zutreffend bis nicht zutreffend bzw. von sehr relevant bis nicht relevant) über mindestens 4 Stufen verteilt war.

Sehr unterschiedlich bewertet wurde die Richtigkeit der Aussagen:

- Der Inhalt sollte in einen weiteren Kontext gesetzt werden, u.a. um das Thema zu motivieren.
- Die Konzeption des Lernprodukts sollte auf einem didaktischen Konzept basieren, welches im Idealfall dem interessierten Nutzer auch in Kurzform beschrieben sein sollte.
- Es sollte aussagekräftige Bewertungen zu den Ergebnissen Übungen / Tests geben.
- (individuelle) Lerner-Unterstützung sollte bereitgestellt werden.
- Es sollte Möglichkeiten zur Personalisierung / Adaption geben.
- Das Thema sollte in einen Lehrplan und / oder in einen weiteren Kontext eingeordnet werden.
- Die Lernumgebung sollte hinsichtlich der Kosten effektiv entwickelt und betrieben werden.
- Es sollte eine nachhaltige Finanzierungsstrategie bestehen.

Sehr unterschiedlich bewertet wurde die Priorität der Aussagen:

- Der Inhalt sollte vollständig sein.
- Der Inhalt sollte in einen weiteren Kontext gesetzt werden, u.a. um das Thema zu motivieren.
- Die Materialien sollten durch nutzerrelevante Metadaten (z.B. Inhalte, Zeitaufwand, Zielgruppe) beschrieben werden.
- Es sollte Maßnahmen für die (technische, inhaltliche und ökonomische) Nachhaltigkeit getroffen sein.

Diese Einschätzungen und Meinungen stellen eine gute Basis für die Diskussion von jenen E-Learning-Aspekten dar, für die es offensichtlich noch keinen Konsens gibt. Möglicherweise stellt die genauere Betrachtung des Kontexts einer Lernumgebung, z.B. der Zielgruppe den Schlüssel für die unterschiedlichen Sichtweisen der Experten dar.

## 6 Zusammenfassung

Als Ergebnis einer, v.a. in KATTERFELD & KÖNIG (2008b) zusammengefassten Diskussion wurden 42 Kriterien zur Bewertung der Qualität von E-Learning identifiziert. Auf Basis dieser Liste konnte im Rahmen einer Evaluationsstudie zur Qualität von E-Learning Produkten im Bereich Fernerkundung, Photogrammetrie und GIS mit der Betrachtung von 30 englischsprachigen Produkten eine repräsentative Anzahl von Angeboten in diesem Bereich abgedeckt werden. Im Ergebnis wurden die Angebote als überwiegend gut und geeignet

bewertet. Problembereiche wurden bei den zugrunde liegenden didaktischen Konzepten mit ihrer Forderung nach Handlungsorientierung (umgesetzt z.B. durch Anregung zu Interaktionen) sowie im Bereich der Interoperabilität mit seiner Forderung nach Austauschbarkeit oder zumindest detaillierter Metadatenbeschreibung identifiziert.

Im Rahmen einer nachgeordneten Validierung der Kriterien-Checkliste durch E-Learning-Experten aus dem deutschsprachigen Raum wurden die Kriterien als gültig und im Allgemeinen auch als relevant eingeordnet. Interessant gestaltet sich die Uneinigkeit der Experten hinsichtlich der Richtigkeit und Relevanz einiger Kriterien (vgl. Kapitel 5). Diese Uneinigkeit verteilt sich jedoch auf verschiedene Kriterienkategorien und sollte im Einzelfall zur Diskussion anregen.

So ist aus Sicht der Autoren beispielsweise erstaunlich, dass die Forderung nach der Konzeption eines Lernprodukts entsprechend eines didaktischen Konzeptes so unterschiedlich hinsichtlich seiner Richtigkeit bewertet wurde. Auch die Auffassung, dass aussagekräftige Bewertungen zu Übungen und Tests zu geben sind, wurde nicht von allen Experten geteilt. Dies sind Kriterien, die auf die aktive Auseinandersetzung mit dem Lernenden und seinem Prozess zur Wissenskonstruktion zielen und sind damit durchaus als wichtig einzustufen.

E-Learning Angebote sind in der Regel mit einem echten Mehrwert für Lernende und Lehrende verbunden. Allerdings kann dieser nur greifen, wenn E-Learning mit einem Mindestmaß an Qualität verbunden und für zukünftige technische und didaktische Entwicklungen offen ist. Umso wichtiger ist es, dass durch Qualitätsbewertungen Stärken und Schwächen des jeweiligen Produkts erkannt und Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt werden. In diesem Zusammenhang gewinnt eine interdisziplinäre Zusammenarbeit mit Didaktikern an Bedeutung, die in unserem Fachgebiet noch viel zu wenig genutzt wird.

## **7 Literaturverzeichnis**

- DONABEDIAN, A., 1980: Explorations in Quality Assessment and Monitoring. Ann Arbor, Health Administration Press.
- EHLERS U.-D., 2006: Myths and realities in learner oriented e-learning quality. In: Ehlers, U.-D. & J.M. Pawlowski (Hrsg.) Handbook on Quality and Standardisation in E-Learning. Springer, Berlin/ Heidelberg New York.
- KATTERFELD, C. & KÖNIG, G., 2008a: Aktuelle E-Learning Angebote und ihre Qualität – Eine ISPRS Studie. In: Tagungsband der 4. GIS-Ausbildungstagung (Potsdam, 2008), CD-ROM.
- KATTERFELD, C. & KÖNIG, G., 2008b: Analysis of E-Learning Software and Guidelines for Quality Assurance in Photogrammetry, Remote Sensing and GIS. Proceedings of the XXIst ISPRS Congress, Vol. XXXVII(Part B6a), p. 45-54 , Beijing, China, 2008.

## Satellitenbilder in der Schule – von der Theorie zur praktischen Anwendung

**SIMONE NAUMANN<sup>1</sup>, ALEXANDRA SIEGMUND<sup>1</sup>, RAIMUND DITTER<sup>1</sup>, MICHELLE HASPEL<sup>1</sup>,  
ISABELLE KOLLAR<sup>1</sup> & ALEXANDER SIEGMUND<sup>1</sup>**

*Zusammenfassung: Fernerkundungsdaten finden bis heute nur zögerlich Einzug in den deutschen Schulunterricht – dabei sind die wissenschaftlichen und didaktischen Potenziale dieser Medien theoretisch bereits bekannt. Eine internationale Vergleichsstudie zum schulischen Satellitenbildeinsatz zeigt (Hinter-)Gründe auf und ermöglicht die analytische Entwicklung eines fernerkundungsdidaktischen Konzeptes. Auf der Basis dieses theoretischen Modells dienen verschiedene Lernumgebungen bzw. Umsetzungsbeispiele dazu, die Anwendung von Satellitenbildern im Schulalltag zu fördern. Der praktische Einsatz der Fernerkundung orientiert sich in den einzelnen Beispielen an unterschiedliche Schularten und Klassenstufen. Die vielfältigen Umsetzungsmöglichkeiten des theoretischen Fernerkundungskonzeptes demonstrieren dabei die Potenziale eines problem- und handlungsorientierten Einsatzes der Fernerkundung als modernes Medium und Arbeitsmittel des Geographieunterrichts.*

### 1 Einleitung

Satelliten- und Luftbildern kommt nicht nur in Wissenschaft, Wirtschaft und Öffentlichkeit eine große Bedeutung zu – inzwischen wird der Einsatz von Fernerkundungsdaten auch in den Bildungsplänen und den nationalen Bildungsstandards des Faches Geographie gefordert. Die konkrete Umsetzung dieses theoretischen Anspruchs im Schulalltag stellt sich bis heute allerdings nur sehr zögerlich ein. Dabei weisen Fernerkundungsdaten durch ihre hohe Anschaulichkeit und Aktualität neben ihrer fachlichen Relevanz vor allem auch ein großes didaktisches Potenzial auf, wie u.a. eine internationale Vergleichsstudie zum Einsatz von Satellitenbildern in der Schule beweist (WOLF & SIEGMUND 2007). Der Einsatz von Satellitenbildern als Arbeitsinstrument im Erdkunde- und fächerübergreifenden Unterricht ermöglicht die Förderung der Medien- und Methodenkompetenz (Bildverständnis, Bildinterpretation), der Lesekompetenz von Bildern sowie die Kompetenzen der räumlichen Orientierung der Schüler als wichtige Basiskompetenzen in einem visuellen Zeitalter (HIEBER & LENZ 2007).

Damit die Arbeit mit Fernerkundungsdaten ähnlich wie die traditionellen Medien Atlas und Diagramme etc. kontinuierlich Einzug in den Schulalltag hält, bedarf es konkreter Umsetzungsmöglichkeiten der theoretischen Konzepte. Neben der analogen Anwendung von Satellitenbildern zur Visualisierung und Bildinterpretation weisen vor allem unterschiedliche digitale Verarbeitungsmöglichkeiten große Potenziale im Geographieunterricht auf.

1) Pädagogische Hochschule Heidelberg, Research Group for Earth Observation – rgeo, Im Neuenheimer Feld 561, 69120 Heidelberg

Verschiedene Lernumgebungen wie interaktive Lernspiele, entdeckende Lernmodule, Lernen mit Satellitenbildern vor Ort und spezielle Fernerkundungssoftware sprechen dabei unterschiedliche Alters- und Schulstufen an und ermöglichen zugleich die Vermittlung von differenzierten Kenntnissen bzw. die konkrete Förderung geographischer Basis-Kompetenzen (vgl. Abb. 1).

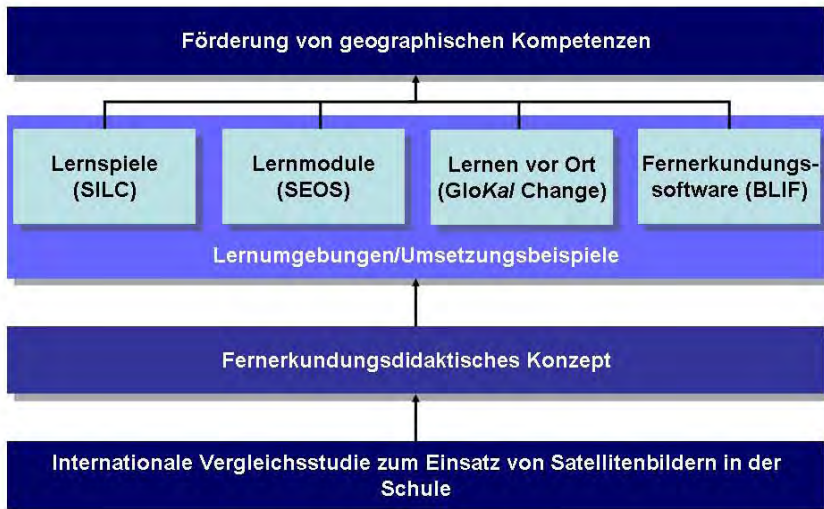


Abb. 1: Modularer Aufbau der Fernerkundungsdidaktik – von den theoretischen Grundlagen zur praktischen Umsetzung

## 2 Fernerkundungsdidaktisches Konzept und praktische Umsetzungsmöglichkeiten für den Einsatz im Geographie-Unterricht

Die Fernerkundung zählt zu dem geographischen Hilfsmittel in der naturwissenschaftlichen Kenntnisfindung, welches in den vergangenen Jahrzehnten die beeindruckendste Entwicklung erfahren und somit die geographische Forschung in starkem Maße angeregt hat. Obwohl in geographiedidaktischen Diskussionen der Satellitenbildeinsatz gefordert wird, ist eine konkrete Umsetzung im Schulalltag noch eher die Ausnahme.

### 2.1 Der Einsatz von Satellitenbildern in der Schule – ein internationaler Vergleich

Eine internationale Vergleichsstudie zum Fernerkundungseinsatz in der Schule ermöglichte neben der reinen Bestandsaufnahme auch die Analyse der Rahmenbedingungen an den Schulen, der Aspekte des konkreten Einsatzes von Satellitenbildern im Unterricht, des Interesses und der

Lernmotivation in Bezug auf Satellitenbilder und des Verständnisses Satellitenbilder zu „lesen“ und zu „interpretieren“.

Gründe, warum Lehrerinnen und Lehrer Satellitenbilder im Unterricht einsetzen sind vielfältig. Der am häufigsten genannte Anlass ist die Motivation, die das Satellitenbild bei den Schülern auslöst. Weitere wichtige Argumente für den Einsatz sind die Aktualität, die schnelle Verfügbarkeit und die Informationsvielfalt des Satellitenbildes. Die Lehrer, die keine Satellitenbilder im Unterricht einsetzen begründen dies insbesondere mit Beschaffungsschwierigkeiten, nicht in der Ausbildung gelernt und der eigenen Unsicherheit im Umgang mit Satellitenbildern (vgl. Abb. 2).

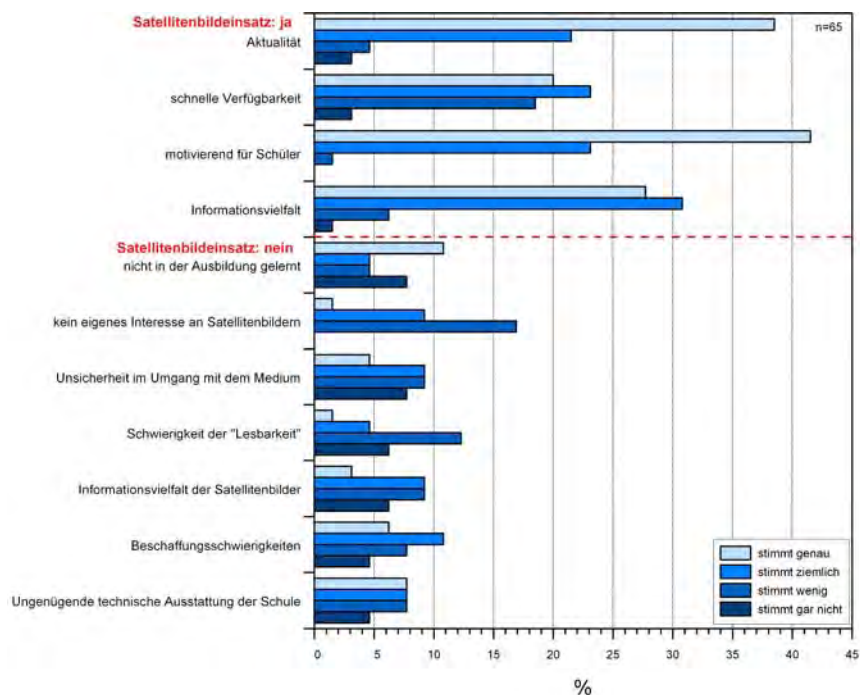


Abb. 2: Gründe, warum Satellitenbilder im Unterricht eingesetzt werden (oben) und Gründe, warum Satellitenbilder nicht im Unterricht eingesetzt werden (unten)

Der Satellitenbildeinsatz im Unterricht stellt sich in den ausgewählten Ländern als sehr heterogen dar. Deutschland liegt mit 53,5% der Probanden, die bereits mit Satellitenbildern im Unterricht gearbeitet haben, im Mittelfeld. England ist mit 83,1% führend und Südkorea mit 38,1% Schlusslicht (vgl. Abb. 3).



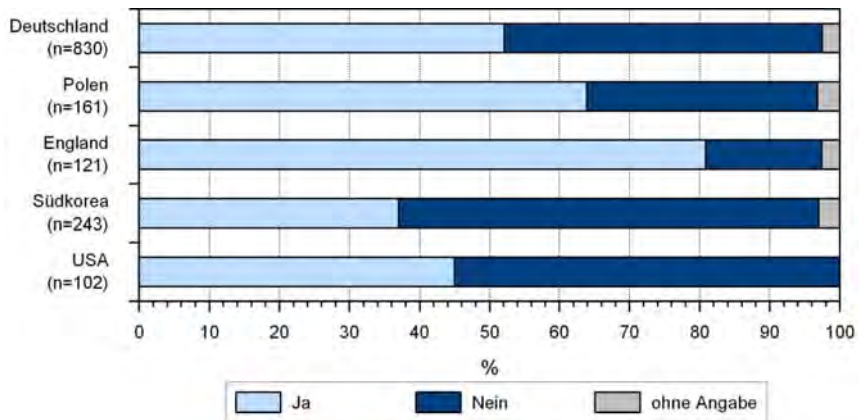


Abb. 3: Satellitenbildeinsatz im Unterricht im Ländervergleich

Die Jugendlichen, die bereits mit Satellitenbildern im Unterricht gearbeitet haben wurden innerhalb des affektiven Bereichs nach Interesse, Motivation und Verständnisschwierigkeiten bei der Arbeit mit Satellitenbildern befragt. Das Interesse an Satellitenbildern ist dabei in allen Ländern mit über 70% sehr hoch. Die Motivation hingegen liegt jeweils signifikant unter dem Interesse. Die größte Diskrepanz weist die USA auf. 97,8% der Probanden stufen das Interesse bei der Arbeit mit Satellitenbildern mit „stimmt genau“, „stimmt ziemlich“ ein. Die Motivation hingegen wird mit nur 28,2% angegeben. Parallel dazu wird speziell in den USA die Arbeit mit Satellitenbildern mit 60% als „schwer zu verstehen“ angegeben. Probanden aus Südkorea schätzen die Arbeit mit Satellitenbildern ebenfalls mehrheitlich als „schwer zu verstehen“ ein. Probanden aus Deutschland, Polen und England hingegen stimmen dieser Einschätzung nicht zu (vgl. Abb. 4).

Erstellt man eine Abhängigkeitsanalyse in Bezug auf die private Nutzung von Google Earth und richtigen Antworten innerhalb der kognitiven Aufgaben ist die Erkenntnis, dass Google Earth einen hochsignifikanten Stellenwert einnimmt. Sowohl bei einer Bewertungsaufgabe von Satellitenbild und Karte als auch bei einer Zuordnungsaufgabe Satellitenbild und Thema sind in allen Ländern die Jugendlichen signifikant besser, die Google Earth kennen und nutzen. Beispielsweise können von den deutschen Jugendlichen, die Google Earth nutzen, 17,9% neun bis elf Bewertungsaufgaben (elf = Maximum) lösen und im Vergleich dazu nur 7,3% derer, die Google Earth nicht nutzen.

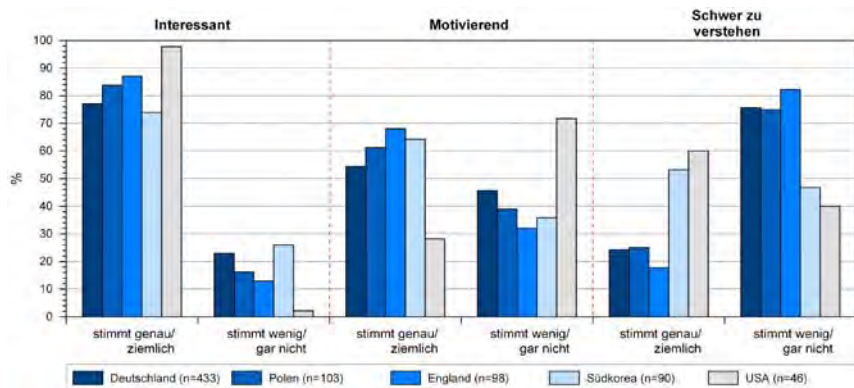


Abb. 4: Interesse, Motivation und Verständnis bei der Arbeit mit Satellitenbildern im Unterricht

Die genannten Ergebnisse stellen einen kleinen Ausschnitt des internationalen Fragebogens dar, an dem insgesamt dreizehn Länder beteiligt waren. Als Konsequenz und Ziel der internationalen empirischen Studie lassen sich Faktoren definieren, die eine Entwicklung einer Fernerkundungsdidaktik beeinflussen, die wiederum die Basis für konkrete Lernumgebungen darstellt (vgl. Abb. 1). Einflussfaktoren sind beispielsweise das Geschlecht, das Alter und die private Nutzung von Satellitenbildern wie zum Beispiel durch Google Earth.

## 2.2 Interaktives und multimediales Lernspiel zur Fernerkundung

Das interaktive und multimediale Lernspiel SILC (Satellite Image Learning Centre) ermöglicht Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe I einen didaktisch reduzierten Zugang bzw. Einstieg zur Fernerkundung. Ziel ist es einerseits, durch einen handlungsorientierten Einsatz von Fernerkundungsdaten bereits in jungen Jahren Interesse und Motivation für naturwissenschaftliche Erkenntnisse zu wecken und andererseits, Kompetenzen wie beispielsweise die Methodenkompetenz oder die räumliche Orientierungskompetenz zu fördern. In zwölf Modulen erarbeiten sich die Anwender spielerisch Wissen in Grundfunktionen der Fernerkundung wie beispielsweise dem Georeferenzieren. Das Lernspiel steht in deutscher, englischer und französischer Sprache auf [www.ph-heidelberg.de/esa](http://www.ph-heidelberg.de/esa) online zur Verfügung.

## 2.3 Interaktive Lerneinheiten zur Fernerkundung und ihrer zahlreichen Anwendungen

Die Förderung naturwissenschaftlicher Kompetenzen bei Schülerinnen und Schülern durch den problembasierten und handlungsorientierten Einsatz von Fernerkundungsmaterialien im Unterricht ist ein weiteres Ziel des fernerkundungsdidaktischen Gesamtkonzeptes. In Kooperation mit elf Partnern und der Europäischen Raumfahrtagentur ESA werden im Rahmen eines von der Europäischen Kommission geförderten Projektes (Activity Code AERO-2005-2.3.2.1e) modulare, interaktive und online basierte Lernmaterialien zum Thema Fernerkundung zunächst in den Sprachen englisch und deutsch für die gymnasiale Oberstufe

aufgebaut („Science Education through Earth Observation for High School“ (SEOS), [www.seos-project.eu](http://www.seos-project.eu)). Die Auswahl und Einbindung der einzelnen Lerneinheiten in eine multimediale Lernumgebung sowie der strukturelle Aufbau basieren auf Ergebnissen von fernerkundungsdidaktischen Untersuchungen (vgl. WOLF, KOLLAR & SIEGMUND 2008).

Die Lernumgebung ist unterteilt in einen Lehrer- und einen Schüler-Bereich. Die Lehrer erhalten zusätzlich zu den Schülerseiten eine didaktische Einführung zur Fernerkundung sowie Sachanalysen zu den einzelnen Lerneinheiten, zusätzliche Aufgabenstellungen und Materialien, die direkt im Unterricht eingesetzt werden können (wie z.B. Aufgaben, Folien, Tabellen, Grafiken, Satelliten- und Luftbilder etc.) sowie eine weiterführende Literatur- und Linkliste. Die Lernumgebung der Schüler beinhaltet verschiedene thematische Lerneinheiten sowie zusätzliche Lernspiele, in denen Fernerkundungsdaten auf unterschiedliche Weise eingesetzt werden. Die Module enthalten neben den didaktisch aufbereiteten Informationen Aufgaben und Materialien für den Einsatz im Unterricht oder die Vertiefung und Lernkontrolle zu Hause. Mit Hilfe der Lernspiele sollen die Schüler spielerisch, handlungsorientiert und problemlösend ihr Wissen über Satelliten- und Luftbilder sowie deren Anwendungen vertiefen.

Auf Basis aktueller Forschungsergebnisse (ALBERTZ 2007, FALK 2004, KERRES 2001, KOLLAR, WOLF, SIEGMUND 2008, SIEGMUND & MENZ 2005) entstehen somit insgesamt 15 internetbasierte eLearning-Einheiten zu ausgewählten Themen der Erdbeobachtung in fünf Themenfeldern. Dabei werden ausgewählte Bereiche der Fächer Geographie, Biologie und Physik etc. behandelt sowie ein fächerübergreifender Einsatz der Fernerkundung möglich gemacht.

Im Modul „Landnutzung und Landnutzungswandel“ des Themenfeldes „Geographie und Biologie“ werden zunächst die verschiedenen globalen Arten der Landnutzungsänderungen in ihrem Ursache-Wirkungskomplex vorgestellt. Anhand einiger Fallbeispiele zum Landnutzungswandel, wie Verstädterung, Globaler Wandel sowie Massentourismus lernen die Schülerinnen und Schüler die Thematik detailliert und problemorientiert kennen.

Verstädterungsprozesse, als eine entscheidende Form der Landnutzungsänderung werden anhand der fünf Megastädte Los Angeles, Mexico City, London, Johannesburg und Mumbai aufgezeigt. Die Analyse erfolgt mit Hilfe von Satellitenbildern unterschiedlicher Zeitpunkte, die somit einen Vergleich der urbanen Situation früher und heute ermöglicht. Abgerundet wird dieses Themenfeld durch die Beleuchtung von Gründen und Auswirkungen der Urbanisierung sowie von zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten.

Das interdisziplinäre und funktionale Konzept der Syndrome des globalen Wandels geht insbesondere auf die Komplexität nicht-nachhaltiger Umweltveränderungen ein. Unterschiedliche ökosystem- und landschaftsbezogene Themenfelder, wie Brandrodung in den Tropen oder die Verlandung des Aralsees werden auf der Basis von Fernerkundungsdaten aufbereitet. Ein weiterer Schwerpunkt innerhalb des Moduls konzentriert sich auf Landnutzungsänderungen durch Massentourismus. In einer entdeckenden Lerneinheit werden die Schülerinnen und Schüler mit den Landnutzungsänderungen auf der spanischen Kanareninsel Teneriffa vertraut gemacht. Nach der Analyse des konkreten Ursachegefüges „Massentourismus“ in diesem insularen Kontext werden weitere Informationen zum globalen Tourismus und seiner weltweiten Entwicklung gegeben (vgl. Abb. 5).

SEAS
Landnutzung und Landnutzungswandel


⏪
⏩
⏴
⏵

Landnutzungsänderung

Soziale und ökonomische Entwicklungsprozesse wie auch der Massentourismus verursachen räumlich differenzierte **Veränderungen der Landbedeckung und -nutzung**. Bevölkerungsteile migrieren aus wirtschaftlich benachteiligten ländlichen Räumen in die städtischen Tourismuszentren. Damit einher geht die Aufgabe an landwirtschaftlich genutzten Flächen sowie eine zunehmende Versiegelung der Landschaft durch Expansion der Siedlungen und touristischer Infrastruktur. Folgen sind die Zersiedelung der Landschaft, eine Fragmentierung der Ökosysteme und ein Verlust an landschaftlicher Heterogenität und biologischer Vielfalt.

**Vergleich früher und heute: Teneriffa im Satellitenbild 1978 und 2002**

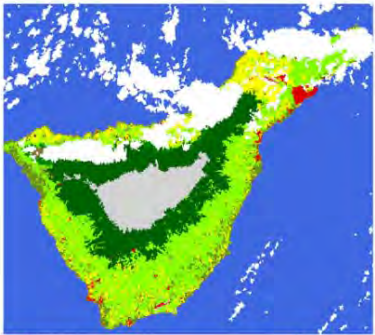
Teneriffa 1978
Teneriffa 2002



**Aufgabe:** Vergleichen Sie die Satellitenbilder von Teneriffa von 1978 und 2002. Achten Sie besonders auf Unterschiede in Vegetation und Bebauung. (Vorsicht: das Satellitenbild von 1978 ist eine Falschfarbendarstellung)

**Aufgabe:** 1. Vergleichen Sie die Klassifikationen Teneriffas von 1978 und 2002.  
 2. Wo sind die Veränderungen der Landnutzung am deutlichsten zu erkennen?  
 3. Was sind mögliche Ursachen? Verfolgen Sie besonders die Entwicklung der Bebauung.  
 4. Können Sie aus dem Vergleich dieser beiden Klassifikationen abschätzen, wo zukünftige Bebauung stattfinden könnte?

Teneriffa 1978
Teneriffa 2002



	Baumheide		Meer		Wasserservoir
	Bebauung		Strand		Wolken
	Halbwüste		Sukkulenterbusch Formation		undclassified
	Niefernwald		Tabibal		
	Landw. Nutzfläche		Trockenwald		
	Lorbeerwald		Vegetationslose Flächen		

Abb. 5: Ausschnitt der Lerneinheit „Landnutzung und Landnutzungswandel“ zum Thema Landnutzungsänderung auf Teneriffa

## 2.4 Glocal Change – Globale Umweltveränderungen mit Satellitenbildern und originalen Begegnungen lokal bewerten

Die Förderung der Bewertungskompetenz und des Transfers von globalen Umweltveränderungen hin zur lokalen Ebene sind die Hauptschwerpunkte dieses Konzeptbausteins „GLOKAL Change – GLOBale Umweltveränderungen loKAL bewerten“. Hierzu dient eine Kombination von multimedialen, interaktiven Lernmodulen und eigenen Untersuchungen im Gelände. Letzteres verknüpft die erarbeiteten Kenntnisse zum Themenkomplex Globaler Wandel mit der konkreten Realität vor Ort. Die zu gestaltende Lernumgebung ist für den Einsatz im schulischen (Sek. I) und außerschulischen Bereich vorgesehen und wird von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert.

Die zu gestaltende Lernumgebung wird Themen aus dem Konzept des „Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen“ (WBGU), die als Syndrome

bezeichnet werden und anhand dessen „Erdkrankheiten“ unabhängig von Regionen beschrieben werden können (WBGU 1996). Satellitenbilder dienen hier zur Veranschaulichung globaler Prozesse sowie zur Visualisierung und Untersuchung von Landschaftsveränderungen auf lokaler Ebene. Die bundesweit vorprozessierten Landsat-Szenen werden als Echtfarben-, Falschfarben- und NDVI-Darstellung in einer webbasierten Lernplattform zur Verfügung gestellt und sind in die Lernmodule eingebunden. Gerade durch den vielfältigen Perspektivenwechsel bei der Arbeit mit Satellitenbildern, als auch durch konkrete schulart- und klassenstufenspezifisch differenzierte und in den außerschulischen Bereich übertragbare handlungsorientierte Aufgabenstellung, wird die Bewertungskompetenz gefördert.

Hinsichtlich des Kerngedanken des Konzepts Bildung nachhaltiger Entwicklung, Menschen zu befähigen, globale Probleme zu erkennen und bewerten zu können (HAAN 2008, ROST 2003), um die Zukunft erfolgreich zu bewältigen, wird mit diesem Konzeptbaustein eine konkrete Umsetzungsmöglichkeit dargelegt.

## **2.5 „Blickpunkt Fernerkundung (BLIF)“ - Schüler forschen auf dem Gebiet der Fernerkundung**

Neben der rein visuellen Darstellungsform von Fernerkundungsdaten stellt die PC-gestützte Arbeit am Satelliten- und Luftbild einen weiteren zentralen Schwerpunkt in der konkreten Umsetzung des fernerkundungsdidaktischen Konzeptes dar (JÜRGENS 2003, Kollar, Wolf & Siegmund 2008). Derzeit auf hauptsächlich vektorbasierte Geographische Informationssysteme (GIS) konzentriert, fehlen didaktisch aufbereitete Software-Angebote für die digitale Analyse von Satellitenbildern im Unterricht. Die Entwicklung einer derartigen schülergerechten und web-basierten Softwarelösung erfolgt im Rahmen des Projektes „BLIF – Blickpunkt Fernerkundung“, das von der Klaus-Tschira-Stiftung gefördert wird. In Kooperation mit einem Softwareunternehmen wird die Entwicklung dieser web-basierten Anwendung umfassend im schulischen Einsatz evaluiert und optimiert und steht anschließend allen Schulen zur Verfügung.

Kennzeichen dieser nach neusten fernerkundungsdidaktischen und technischen Standards konzipierten Software wird eine altersgemäße und intuitive Bedienbarkeit sein – eine Anpassung an die Bedürfnisse und Fragestellungen der Schüler ist somit möglich. Die Software ist demnach sowohl für Schüler der Sekundarstufe I geeignet als auch für Oberstufenschüler.

Der Funktionsumfang des Programms reicht dabei von reinen Grundfunktionen (wie dem Import und Export von Bilddaten, einer Zoomfunktion oder der Umwandlung von Vektor- in Rasterdaten und umgekehrt), über Möglichkeiten der Bildaufbereitung, zu der vor allem verschiedene Optionen der Bildverbesserung (wie die Helligkeits- und Kontrastregulierung und das „Stretching“ der Bilddaten) sowie die Georeferenzierung der Bilddaten zählt. Eine weitere Funktionalität des Programms stellt die Bildbearbeitung und Bildklassifikation dar. Hier haben die Schüler und Schülerinnen die Möglichkeit so genannte „Kanalkomposits“ zu erstellen, d.h. die Daten mehrerer Spektralkanäle zu kombinieren um dadurch die Interpretationsmöglichkeiten des Satellitenbildes im Hinblick auf eine anschließende Klassifikation deutlich zu verbessern. Weiterhin bietet das Programm den jungen Forschern die Möglichkeit verschiedene

standardisierte Indices zu bilden, um so beispielsweise die Vitalität der Vegetation zu ermitteln (ALBERTZ 2007).

Die Anwendungsgebiete der Fernerkundung sind hierbei stets fächerübergreifend und stellen neben der Geographie enge Verbindungen sowohl zu den naturwissenschaftlichen, mathematischen Fachbereichen als auch zur Informatik her. Mögliche inhaltliche Fragestellungen sind dabei sehr weit gestreut. Sie reichen von aktuellen Themen wie Klimawandel, Desertifikation oder Luftverschmutzung bis hin zu Themengebieten wie Stadtentwicklung, Tourismus, landwirtschaftliche Nutzungsformen oder Exploration von Rohstoffen. Die oberste Maxime im Umgang mit den Satellitenbildern bleibt stets, den Schüler und die Schülerin dazu anzuregen als zukünftiger Nachwuchswissenschaftler auf dem Gebiet der Fernerkundung zu agieren, indem er/sie eigenständig Daten bearbeitet und auswertet. Diese Lernumgebung möchte damit einen modernen und handlungsorientierten Weg anbieten (HAUBRICH 2006), die Fernerkundung zunehmend in den Geographieunterricht zu etablieren und damit einen wesentlichen Beitrag zur Förderung der Raumverhaltenskompetenz leisten.

### **3 Ausblick**

Die Fernerkundung im Schulalltag stärken – ein Ziel das mit Hilfe der aufgezeigten unterschiedlich konzipierten Umsetzungsbeispiele gelingen kann. Die Möglichkeiten Satellitenbilder im Geographieunterricht einzusetzen sind groß, aber auch bei diesem Medium gilt es die Art der Anwendung auf die jeweilige Schulart und Klassenstufe anzupassen. Die Vielfalt der Beispiele zeigt sich auch in der Breite der unterschiedlichen fachwissenschaftlichen und mediendidaktischen Kompetenzen und Kenntnissen der Schüler die jeweils gefördert werden. Die vorgestellten Lernumgebungen als Stadien der Fernerkundungsdidaktik können dabei einzeln oder auch in Kombination durchlaufen werden.

Fort- und Weiterbildungen von Lehrern und die curriculare Festschreibung von Fernerkundung bereits im Studium sind darüber hinausgehende Möglichkeiten die „Scheu“ vor dem Einsatz von Satellitenbildern im Schulunterricht zu reduzieren. Erste Erfahrungen haben gezeigt wie das Interesse von Lehrern steigt, die erst einmal einen Einstieg in die Fernerkundungsthematik gefunden haben – sei es im Studium oder bei Fortbildungen (KOLLAR, SIEGMUND & SIEGMUND 2008, VOB, GOETZKE & HODAM 2008). Diese Motivation der Lehrer ist unabdingbar, um den Einsatz von Satellitenbildern in der Schule zu fördern und um die gedankliche Brückenfunktion Lehrer-Schüler zu ermöglichen.

### **4 Literaturverzeichnis**

- ALBERTZ, J., 2007: Einführung in die Fernerkundung: Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- DE HAAN, G., 2008: Gestaltungskompetenz als Kompetenzkonzept für Bildung für nachhaltige Entwicklung. In: Bormann, I., Haan, G. de (Hrsg.) 2008: Kompetenzen der Bildung für nachhaltige Entwicklung, VS Verlag, Wiesbaden. S. 23-44.

- FALK, G., 2004: Internetunterstützter Geographieunterricht. *Geographie und Schule*, **26** (147), S. 8-15.
- HAUBRICH, H., 2006: Geographie unterrichten lernen; Oldenburg
- HIEBER, U. & LENZ, T., 2007: Bilder lesen lernen. *Geographie heute*, **28** (253), S. 2-11.
- JÜRGENS, C., 2003: Geo-Fernerkundung- was ist das? *Praxis Geographie*, **3**; S. 4-7.
- KERRES, M., 2001: Multimediale und telemediale Lernumgebungen: Konzeption und Entwicklung. Oldenbourg, Wien.
- KOLLAR, I.; SIEGMUND, A. & SIEGMUND, A., 2008: Future ways of learning through remote sensing in school. Donert, K., Wall, G., Hrsg.: *Future Prospects in Geography. HERODOT Conference Proceedings*, 4-7<sup>th</sup> September 2008, Liverpool Hope University, S. 431-438.
- KOLLAR, I.; WOLF, A. & SIEGMUND, A., 2008: Fostering 'subjective evaluation faculty' of teenagers in the area of environmental changes by using satellite images in school. Jekel, Koller, Strobl, Hrsg.: *Lernen mit Geoinformationen III*, Heidelberg, S. 70-75.
- ROST, J.; LAUSTRÖER, A. & RAACK, N., 2003: Kompetenzmodelle einer Bildung für Nachhaltigkeit. *Praxis der Naturwissenschaften, Chemie in der Schule*, **8** (52), S.10-15.
- SIEGMUND, A. & MENZ, G., 2005: Fernes nah gebracht. *Geographie und Schule*, **154**, (4), S. 2-10.
- VOB, K.; GOETZKE, R. & HODAM, H., 2008: Wie wird das Thema „Fernerkundung“ im Unterricht angenommen? – Erste Ergebnisse einer Fallstudie. Jekel, Koller & Strobl, Hrsg.: *Lernen mit Geoinformationen III*. S. 8-14.
- WBGU, 1996: *Welt im Wandel: Herausforderung für die deutsche Forschung. Jahresgutachten des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- WOLF, A. & SIEGMUND, A., 2007: *The Earth from Above – An International Study on Remote Sensing in Modern School Geography. Challenges and Possibilities*. Catling, S. & Taylor L., Hrsg.: *Changing Geographies: Innovative Curricula*, Oxford, S. 363-368.
- WOLF, A.; KOLLAR, I. & SIEGMUND, A., 2008: Faszination Fernerkundung: Satellitenbildeinsatz im Unterricht. *Praxis Geographie*, **38** (4), S. 44-46.

# **Interaktive Lernmodule zum Thema Fernerkundung – Balance zwischen analoger Bildinterpretation und umfangreichen Softwarelösungen**

**KERSTIN VOSS<sup>1</sup>, ROLAND GOETZKE<sup>1</sup>, HENRYK HODAM<sup>1</sup>**

*Zusammenfassung: Trotz der politischen Forderungen das Thema Fernerkundung im Schulunterricht zu stärken, spielt die Fernerkundung noch immer eine untergeordnete Rolle. Viele der explizit für den Schulunterricht entwickelten Softwarelösungen scheinen aufgrund ihrer Komplexität keinen Eingang in den Schulunterricht zu finden. In der Folge wird das Thema entweder gar nicht in den Unterricht integriert oder geht bestenfalls nicht über die Stufe einer analogen Bildinterpretation hinaus. Da Fernerkundung jedoch mehr als die rein visuelle Interpretation von Satellitenbildern darstellt, erfordert es auch der Förderung von physikalischen und mathematischen Grundlagen sowie von Medien- und Methodenkompetenzen. Für eine nachhaltige Integration des Themas Fernerkundung an Schulen werden daher digitale, interaktive und fächerverbindende Lernmodule vorgestellt, die sowohl die Medien- und Methodenkompetenz als auch das eigenständige Arbeiten der Schüler/Inner fördern.*

## **1 Einleitung**

Innerhalb der modernen Informationsgesellschaft stellt die Fernerkundung als Teil der Luft- und Raumfahrtindustrie eine Schlüsseltechnologie dar und verfügt über eine zunehmende wirtschaftliche Bedeutung. Dies drückt sich u.a. in einer stetigen Entwicklung neuer Sensoren, wie beispielsweise TerraSAR-X & RapidEye und einem steigenden Bedarf an qualifizierten Arbeitskräften, aus.

Ferner bestimmen Satellitenbilder mehr und mehr unseren Alltag – nicht nur durch die Wettervorhersage in den Nachrichten, immer häufiger werden Fernerkundungsdaten auch bei Berichten über Naturkatastrophen oder den globalen Klimawandel in die Berichterstattung implementiert. Darüber hinaus nutzen 80% der deutschen Schüler/Inner laut Umfrage regelmäßig Google Earth. Allein im Jahre 2006 wurde das Programm mehr als 100 Millionen Mal herunter geladen (<http://google.org>).

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Bedeutung von Themen des globalen Umweltwandels auch in den Medien sowie einer hohen Nachfrage nach Arbeitskräften im Bereich der Ingenieur- und Naturwissenschaften, kann die Fernerkundung mit faszinierenden Satellitenbildern und einer modernen Technologie dazu beitragen, Schüler/Inner für diese Themen zu begeistern.

Neben einer stärkeren naturwissenschaftlich ausgerichteten Bildung, birgt der Einsatz von Fernerkundung im Unterricht eine Reihe weiterer Vorteile in sich:

---

<sup>1</sup> Arbeitsgruppe Fernerkundung, Geographisches Institut, Universität Bonn, Meckenheimer Allee 166, 53115 Bonn



- Fernerkundungsdaten bieten die Möglichkeit, eine Vielzahl lehrplanspezifischer Themen der Fächer Geographie, Biologie, Mathematik, Physik und Informatik **problemorientiert und integrativ** zu bearbeiten.
- Die hohe Aktualität und Vielzahl an räumlichen, zeitlichen & spektralen Auflösungen von Fernerkundungsdaten ermöglicht die Bearbeitung von **aktuellen** und **dynamischen Fragestellungen**.
- Die Bildhaftigkeit der Daten ermöglicht eine **neue Sichtweise** auf bestimmte Problemstellungen und bietet eine **hohe Anschaulichkeit**.
- Durch die Kombination von Bildern und Technik haben Fernerkundungsdaten eine **motivierende und faszinierende Wirkung** auf die Schüler/Inner.
- Durch die selbstständige Arbeit mit den Fernerkundungsdaten können **methodische Kompetenzen** der Schüler/Inner im Bereich der Informationsverarbeitung, dem Umgang mit EDV und der digitalen Bildverarbeitung gefördert werden.
- Der Einsatz von Fernerkundung im Unterricht erlaubt die Umsetzung von neuen Lehr-, Lern- und Unterrichtsformen.

Aufgrund dieser vielfältigen Vorteile wird bereits eine langjährige Diskussion geführt, Satellitenbilder als zusätzliches Medium stärker im Schulunterricht einzusetzen (ANTE & BUSCHE 1979, BRUCKER 1981, FRÖMEL 1981, HASSENPFUG 1996, THEISSEN 1986). Entsprechend wird in den aktuellen Bildungsplänen sowie in den Bildungsstandards der Deutschen Gesellschaft für Geographie (DGfG) zumindest für das Fach Geographie ein stärkerer Einsatz moderner Medien und Arbeitsmittel ausdrücklich gefordert. In einigen deutschen Bundesländern ist der GIS- und Fernerkundungseinsatz sogar explizit verpflichtend verankert. Trotz dieser Entwicklung spielt das Thema Satellitenfernerkundung in europäischen Schulen immer noch eine untergeordnete Rolle (NEUMANN-MEYER 2005, SIEGMUND & MENZ 2005, REUSCHENBACH 2006, REUSCHENBACH 2007 a).

Darüber hinaus ist festzustellen, dass Satellitenbilder, wenn sie in den Schulunterricht implementiert werden, primär im Geographieunterricht eingesetzt werden. Aufgrund der engen Vorgaben des Lehrplans bleibt den Lehrer/Innen innerhalb des Geographieunterrichts jedoch nur ein relativ geringes Zeitfenster, um neue Themen zu integrieren. Dementsprechend erfolgt die Integration von Satellitenbildern oftmals nur zur Veranschaulichung lehrplanrelevanter Sachverhalte. Ohne eine intensive Auseinandersetzung mit den Bilddaten können jedoch die methodischen Kompetenzen der Schüler/Inner nicht gefördert werden. Aus diesem Grund wurde von REUSCHENBACH (2007 a) ein Band mit Folien- und Arbeitsmaterialien für das Fach Geographie der Klassen 5 bis 13 entwickelt, der auf eine intensive Auseinandersetzung mit den Satellitenbildern abzielt. Die Integration der Fernerkundung dieses Ansatzes erfolgt in Form des analogen Mediums der Farbfolie. Die Satellitenbilder der insgesamt 32 Farbfolien werden problemorientiert in verschiedene geographische Fragestellungen eingebunden und dienen als Arbeitsmittel, um verschiedene geographische Fragestellungen zu beantworten. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass visuelle Kompetenzen als auch die Raumorientierung der Schüler/Inner gefördert werden (REUSCHENBACH 2007 b).

Fernerkundung umfasst jedoch mehr als die reine, visuelle Interpretation von Luft- und Satellitenbildern, so dass dieser Ansatz nur einen Bereich des Themenspektrums der

Fernerkundung abgedeckt. Im Wesentlichen vernachlässigt der Ansatz die physikalischen und mathematischen Grundlagen der Fernerkundung als auch den Umgang mit „Neuen Medien“.

Um diese Reduktion zu vermeiden gab und gibt es Bestrebungen, das Thema Fernerkundung anhand einer explizit für Schüler/Inner entwickelten Software (z.B. LeoWorks oder MultiSpec) in den Schulunterricht zu integrieren. Trotz der Tatsache, dass diese Programme ausdrücklich für den Einsatz im Schulunterricht entwickelt wurden, scheinen sie aufgrund ihrer Komplexität keinen breiten Eingang in den Schulunterricht zu finden. Eine Befragung der am Projekt „Fernerkundung in Schulen (FIS)“ der Universität Bonn beteiligten Lehrer/Innen<sup>2</sup> zeigt, dass die Einarbeitung in diese Programme zu zeitintensiv und arbeitsaufwendig ist. Hinzu kommt, dass viele der befragten Lehrer/Innen die aufwändigen Installationen der Programme scheuen.

Um einen intensiveren Einsatz der Fernerkundung im Unterricht zu fördern, wurde im Rahmen des vom BMWi geförderten Projektes „Fernerkundung in Schulen (FIS)“ am Geographischen Institut der Universität Bonn ein neues didaktisches Konzept entwickelt. Dieses Konzept geht über die Stufe der analogen Bildinterpretation hinaus, und behandelt die Fernerkundung in ihrer gesamten Breite, inklusive der physikalischen und mathematischen Grundlagen. Bei der digitalen Umsetzung wird jedoch auf aufwändige und komplexe Softwarelösungen verzichtet. Als nachhaltige und im Schuleinsatz praktikable Lösung wird der Einsatz digitaler, interaktiver und fächerübergreifender Lernmodule angesehen, da diese sowohl die Medien- und Methodenkompetenz als auch das eigenständige Arbeiten der Schüler/Inner fördern.

## 2 Unterrichtskonzept

ALEAN & BIBER (2005) fassen die Vorteile der Fernerkundung für den Unterricht folgendermaßen zusammen: *„Satellitenbilder verdeutlichen, heben hervor und machen aufmerksam – vor allem aber ermöglichen sie es Schülerinnen und Schülern ...Zusammenhänge selbst zu erkennen“* (ALEAN & BIBER 2005:35).

Aus diesem Grund erfolgt die Integration des Themas Fernerkundung im Schulunterricht über bifunktionale, interaktive und digitale Lernmodule, um die Thematik durch Animation und Interaktion nachhaltig zu vermitteln. Durch die intensive Beschäftigung mit Problemstellungen und dem Lösen von Aufgabenstellungen wird das Ziel verfolgt, den Schüler/Inner das Medium Computer nicht als reines Informations- und Unterhaltungsgerät, sondern auch als Werkzeug näher zu bringen. Durch die praktischen Arbeiten am Computer und das damit verbundene Experimentieren, Ergründen und Analysieren werden auch aktuelle Themenkomplexe der Informationsverarbeitung behandelt, sodass insgesamt der allgemeine Umgang mit EDV verbessert wird. Entsprechend wird die Methoden- und Medienkompetenz der Schüler/Inner über die praktische Nutzung und Anwendung gefördert. Im Sinne der konstruktivistischen Didaktik fördern die interaktiven Lernmodule ebenfalls das selbstständige Arbeiten der Schüler/Inner. Entsprechend zielen die Unterrichtseinheiten über das zur Verfügung stellen von Hintergrundinformationen, Abbildungen und Animationen sowie Aufgabenstellungen auf ein selbstständiges Erschließen und Lösen von Problemstellung ab.

---

<sup>2</sup> Gefördert BMWi, Projektträger DLR

Darüber hinaus werden folgende Ziele verfolgt:

**Förderung des vernetzten Lernens** - Aufgrund der Komplexität des Themas Fernerkundung wird das Thema auf mehrere Unterrichtsfächer verteilt (vgl. VOSS, HODAM & GOETZKE 2008). Hierbei werden die theoretischen und physikalischen Grundlagen in den Fächern Mathematik, Informatik und Physik behandelt. Infolgedessen wird in diesen drei Grundlagenfächern die theoretische Basis für eine anwendungsbezogene Integration des Themas Fernerkundung im Geographie- und Biologieunterricht geschaffen. Über die gezielte Zusammenarbeit verschiedener Fächer werden bei den Schüler/Inner das vernetzte Denken, die Herstellung von fächerübergreifenden Bezügen und die Fähigkeit zu einer ganzheitlichen Betrachtungsweise gefördert.

**Nachhaltige Integration des Themas Fernerkundung** - Um fernerkundliche Lehrthemen dauerhaft in den Unterricht zu integrieren, ist eine Vernetzung des Themas mit im Curriculum bestehenden Unterrichtsthemen notwendig. Hierüber wird nicht nur die Motivation bei der Bearbeitung klassischer Unterrichtsinhalte, sondern auch das Lernspektrum erhöht, da neben den im Lehrplan vorgesehenen Inhalten auch inhaltliche und methodische Aspekte der Fernerkundung vermittelt werden (vgl. VOß, HODAM & GOETZKE, 2008).

**Kompetenzförderung** - Über eine konstruktivistische Herangehensweise und die intensive Beschäftigung und Analyse mit Satellitenbildern werden verschiedene Kompetenzen der Schüler/Inner gefördert. Diese umfassen vor allem die visuellen Kompetenzen, die Medien- und Methodenkompetenz sowie die Kompetenz zum eigenständigen Arbeiten.

Das gesamte Unterrichtskonzept unterscheidet sich im Gegensatz zu lehrerzentrierten Unterrichtsformen dadurch, dass die Schüler/Inner aktiver am Unterricht beteiligt werden. Durch die aktive Einbindung der Schüler/Inner in den Unterricht ändert sich entsprechend die Rolle der Lehrer/Innen hin zu einem Lerncoach(s.o.) (vgl. VOSS et.al.2008 b).

### 3 Unterrichtsbeispiele

Anhand von vier Beispielen soll aufgezeigt werden, wie die digitalen Lernmodule in den Fächern Physik, Informatik, Mathematik und Erdkunde eingesetzt werden. Entsprechend einer nachhaltigen Integration werden die Lernmodule mit bestehenden Themen des Lehrplans verknüpft. Alle digitalen Lernmodule zeichnen sich durch einen hohen Grad an Interaktivität aus, so dass den Schüler/Inner durch ein aktives und selbstständiges Arbeiten mit dem Lernmodul Raum zu einer intensiven Auseinandersetzung mit der Thematik gegeben wird. Das Verständnis soll vor allem durch vielfältige interaktive Möglichkeiten unterstützt und gefördert werden.

Beispielsweise können die Schüler/Inner eigenständig unterschiedliche spektrale Kanäle miteinander kombinieren und sich unmittelbar mit den Unterschieden im Bild auseinandersetzen und vertraut machen. Um die intensive Beschäftigung mit den Inhalten zu fördern, befindet sich am Ende jedes Modulteils ein Quiz, in dem die Schüler/Inner ihr neu erworbenes Wissen testen können. Erst wenn die Schüler/Inner die gestellten Fragen richtig beantwortet haben, gelangen sie in den nächsten Modulteil. Diese Abfrage wird als eine Hilfestellung für die Schüler/Inner angesehen, da diese somit nicht unmittelbar mit dem gesamten Stoff konfrontiert und möglicherweise überfordert werden. Wurde ein Modulteil einmal erfolgreich abgeschlossen,

können die Schüler/Inner zwischen den Modulteilten hin- und herwechseln, um Sachverhalte zum Lösen der nachfolgenden Fragestellungen noch einmal nachzuschlagen.

### 3.1 Physik – Dem Unsichtbaren auf der Spur

Der Lehrplan Physik für die Sekundarstufe I sieht in NRW den Themenbereich Optik vor. Dieser gliedert sich in die drei Untergruppen „Licht an der Grenzfläche“, „Optische Linsen“ und „der Sehvorgang und optische Instrumente“.

Innerhalb dieser drei Themenkomplexe können Satellitenbilder eine Art Brücke darstellen, da die physikalischen Grundlagen der Satellitenfernerkundung von der Aufnahme bis zum „fertigen“ Satellitenbild reichen. Das **Ziel** der Unterrichtseinheit „Dem Unsichtbaren auf der Spur“ ist es, Zusammenhänge zwischen dem elektromagnetischen Spektrum, Reflexion, Absorption und der Aufnahme und Entstehung von Satellitenbildern zu verstehen. Infolgedessen werden die Themen aus allen drei Untergruppen miteinander in Bezug gesetzt.

Insgesamt setzt sich die Unterrichtseinheit „Dem Unsichtbaren auf der Spur“ aus mehreren Teilen zusammen. Der erste Teil des Lernmoduls führt die Schüler/Inner zunächst in die Thematik der Reflexion ein, indem die Schüler/Inner mit einem virtuellen Professor spielerisch einen Versuch zur Reflexion unterschiedlicher Objekte durchführen. Das Ziel dieses Versuchs ist eine Charakterisierung der unterschiedlichen Objekte hinsichtlich ihrer Reflexionseigenschaften. Damit die Schüler/Inner an Erfahrungen und Hintergrundwissen aus dem Alltag anknüpfen können, konzentriert sich der erste Modulteil auf den Bereich des sichtbaren Lichts des elektromagnetischen Spektrums. Im zweiten Modulteil können die Schüler/Inner dann ihr neu erworbenes Wissen aus dem virtuellen Labor auf einen Satelliten übertragen. Entsprechend besteht das Ziel des zweiten Teils des Lernmoduls darin die Funktionsweise eines Satelliten zu verstehen. Im Mittelpunkt steht infolgedessen folgende Fragestellung: Wie wandelt ein Satellit die empfangenen Reflexionssignale in eine farbige Bildinformation um? Im letzten Modulteil erfolgt die gesamte Betrachtung des elektromagnetischen Spektrums und entsprechend eine Auseinandersetzung damit, dass ein Satellit neben dem Bereich des sichtbaren Lichts auch andere Wellenlängen nutzen kann.

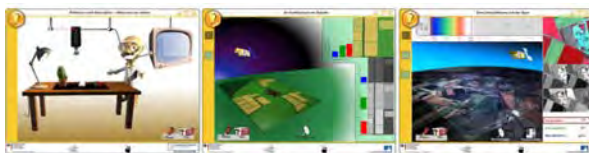


Abb. 1: Lernmodul „Dem Unsichtbaren auf der Spur“

### 3.2 Informatik– Kontrastprogramm

Das Lernmodul „Kontrastprogramm“ knüpft an den Themenbereichen „Wirkprinzipien von Informatiksystemen“ und „Interaktion mit Informatiksystemen“ an und fordert somit eine Auseinandersetzung mit Datenstrukturen und digitaler Bildverarbeitung. Die Komplexität des Moduls ist so gestaltet, dass das Lernmodul in den Jahrgangsstufen 9 und 10 eingesetzt werden kann.

Die Beschäftigung mit Satellitenbildern bietet sich innerhalb dieser Themenkomplexe besonders an, da anhand von Satellitenbildern der Aufbau von digitalen Bildern sowie die Grundlagen der digitalen Bildverarbeitung sehr anschaulich vermittelt werden können. Das Ziel der Unterrichtseinheit „Kontrastprogramm“ ist es, die Grundlagen der digitalen Bildverarbeitung verstehen zu lernen.

Im ersten Teil des Lernmoduls werden die Schüler/Inner zunächst in die Thematik der digitalen Bildverarbeitung eingeführt. Hierzu steht Ihnen ein Ausschnitt eines Satellitenbildes, auf dem die Freiheitsstatue abgebildet ist, zur Verfügung. Nachdem die Schüler/Inner das Lernprogramm starten, sehen sie als Ausgangsbild ein Bild, das zwei Probleme in sich birgt: 1. ist das Bild relativ kontrastarm, 2. sind im Bild zwei „fehlerhafte“ Pixel enthalten. Um zunächst den Aufbau von digitalen Bildern nachzuvollziehen, sollen die Schüler/Inner die Lage der zwei „fehlerhaften“ Pixel interaktiv bestimmen. Hierzu können die Schüler/Inner den im Bild integrierten Cursor über die Eingabe der Zahlenwerte für Bildspalte und Bildzeile verschieben.

Im zweiten Modulteil sollen die Schüler/Inner die Grauwerte der beiden im Bild enthaltenen fehlerhaften Pixel korrigieren. Hierzu können Sie sich in der Info-Box umfassend darüber informieren, was man unter einem 1, 2, 3, 4 und 8 Bit-Bild versteht. Ebenfalls wird in der Info-Box auf den Zusammenhang der zur Verfügung stehenden Grauwerte bei unterschiedlichen Bit-Stufen sowie die binäre Darstellung der Grauwerte eingegangen. Zur Vertiefung des Wissens sollen die Schüler/Inner die Grauwerte der fehlerhaften Pixel interaktiv über die Eingabe der korrekten Binärwertkombination korrigieren. Für einen einfachen Einstieg steht ihnen hierzu zunächst ein 4-Bit-Bild zur Verfügung. In einem weiteren Arbeitsschritt werden die beiden Pixel noch einmal in einem 8-Bit-Bild korrigiert.

Der letzte Teil des Lernmoduls konzentriert sich auf die Verbesserung des Bildkontrastes. Die Grauwertverteilung des Bildes wird den Schüler/Inner in einem Histogramm angezeigt. Die Schüler/Inner werden dazu aufgefordert sich zunächst über den Wertebereich, den die Bildpixel einnehmen, zu informieren. Im Anschluss können die Schüler/Inner die Wertebereiche interaktiv anpassen und so den Kontrast des Bildes verbessern.

=



Abb. 2: Lernmodul „Kontrastprogramm“

### 3.3 Mathematik – Pixel auf Abwegen

Das Lernmodul „Pixel auf Abwegen“ ist für die Jahrgangsstufe 8 konzipiert und setzt sich mit der Kombination von linearen Funktionen und der geometrischen Korrektur von Fernerkundungsbildern auseinander. Insgesamt setzt sich das Lernmodul aus vier Teilen zusammen. Der erste Modulteil stellt eine animierte Einführung dar, in dem die Problemstellung kurz geschildert wird: „Der Rohbau eines wichtigen Bauprojektes ist in diesem Winter durch ein Hochwasser überschwemmt worden. Jetzt soll ein Flugzeug die Baustelle aus der Luft scannen, um das

*Ausmaß der Schäden sichtbar zu machen. Gerade als sich das Flugzeug beinahe über dem Zielgebiet befindet, wird es durch eine Windböe vom Kurs abgebracht. Das entstandene Bild ist nun verzerrt und eigentlich nicht zu gebrauchen. Es sei denn man gleicht den Fehler mathematisch wieder aus...*

Ausgehend von dieser Einführung sollen die Schüler/Inner im zweiten Teil den Kern des Problems erfassen. Dazu stehen ihnen zwei Bilder zur Verfügung. Ein unverzerrtes Vergleichsbild und das verzerrte Bild. Ziel ist es, über einen Bildvergleich die Unterschiede in den Bildern genau zu benennen und zu beschreiben. Zur detaillierten Bildanalyse steht den Schüler/Inner ein Tool zur Verfügung mit dessen Hilfe sie in beiden Bildern einen Bildausschnitt vergrößern können. Der Unterschied in der Lage der Pixel kann somit genau erfasst und beschrieben werden. Über die intensive Auseinandersetzung mit den Bildern und die detaillierte Beschreibung der Bildunterschiede werden somit auch im Mathematikunterricht die visuellen Fähigkeiten und die Sprachkompetenzen der Schüler/Inner gefördert.

Um sich weiteres Hintergrundwissen anzueignen, können die Schüler/Inner in einer Info-Box recherchieren. Hier erfahren sie grundlegende Informationen zum Thema „Pixel“ und „Aufbau eines digitalen Bildes“. Die erworbenen Kenntnisse ermöglichen es den Schüler/Inner zunächst verbal zu formulieren, was ein Computerprogramm tun müsste, um die Pixel wieder in die korrekte Position zu bringen. Somit kann eine erste Verknüpfung zwischen dem verzerrten Luftbild und der Mathematik hergestellt werden und das mathematische Wissen auf eine konkrete, reale Situation übertragen werden.

Im dritten Modulteil findet nun die Verknüpfung der mathematischen Grundlagen mit dem praktischen Beispiel statt, indem eine einfache lineare Funktion zur Korrektur des Bildes gesucht wird. Hierzu stehen den Schüler/Inner das verzerrte Bild, Angaben zur Abweichung des Flugzeugs von der optimalen Flugbahn und ein Koordinatenkreuz zur Verfügung. Die Umrechnung der Realmaße des gescannten Bereiches in Pixelmasse ermöglicht die Beschreibung der Verzerrung als Graph in einem interaktiven Graphenmodul. Durch Errechnen und Anpassen der zugehörigen Funktion sollen die Schüler/Inner der Lösung näher kommen.

Im vierten Modul können die Schüler/Inner die von ihnen errechneten und angepassten Funktionen testen, indem sie ihre Ergebnisse in einem Eingabefeld in das Modul eintragen. Das Bild wird nun der eingegebenen Funktion entsprechend dargestellt. Das bedeutet auch, dass eine ungeeignete Funktion ein falsches Bild als Ergebnis liefert. Da jedoch auch diese falschen Ergebnisse Resultate einer Funktion sind, sind sie durchschaubar und helfen nachzuvollziehen, wie eine Funktion arbeitet.



Abb. 3: Lernmodul „Pixel auf Abwegen“

### 3.4 Erdkunde – Tsunami

Die Unterrichtseinheit „Tsunami“ gehört in das Themenfeld Gefährdung von Lebensräumen in der Klasse 7. Das Ziel der Unterrichtseinheit ist es, die Bedeutung von Naturgefahren kennen zu lernen, eine Raumwahrnehmung und -bewertung vorzunehmen, die Entstehungsmöglichkeiten und Ursachen von Tsunamis zu verstehen sowie die Möglichkeiten der Fernerkundung zur Schadensermittlung kennen zu lernen.

Im ersten Teil des Lernmoduls werden die Schüler/Inner zunächst von dem aus dem Physik-Modul bekannten Professor in die Thematik der Naturgefahren allgemein und Tsunami im speziellen eingeführt, indem die Schüler/Inner sich in einer Zeitung, die der Professor liest, über die Hintergründe des Tsunami 2004 in Südost-Asien informieren können. Im zweiten Modulteil soll das Wissen aus der virtuellen Zeitung des Professors mit zwei Satellitenbildern (1. Bild vor und 2. Bild nach dem Tsunami) verknüpft werden. Zunächst sind die Schüler/Inner aufgefordert, die beiden Satellitenbilder über einen interaktiven Regler miteinander zu vergleichen und sich in den beiden Bildern zu orientieren. Anschließend sollen die Schüler/Inner die Strukturen benennen, die durch den Tsunami zerstört wurden. Ebenfalls sollen sich die Schüler/Inner in die Bewohner hineinversetzen und überlegen welche Auswirkungen die Zerstörungen für die Bewohner haben.

Darüber hinaus werden die Schüler/Inner dazu aufgefordert zu überlegen, welchen Wert Satellitenbilder in Katastrophenfällen haben und wofür diese Bilder in solch einem Fall eingesetzt werden können. Hierzu finden die Schüler/Inner nähere Informationen in der Info-Box, in der das Verfahren der Change Detection anschaulich in einem kurzen Film erklärt wird. Nachdem die Schüler/Inner das Prinzip der Change Detection verstanden haben, können sie im letzten Modulteil einzelne Landoberflächen klassifizieren und beispielsweise ermitteln wie viel der im Bild dargestellten Landfläche von Wasser überspült wurde oder wie viel der landwirtschaftlichen Fläche durch den Tsunami zerstört wurde.



Abb. 4: Lernmodul „Tsunami“

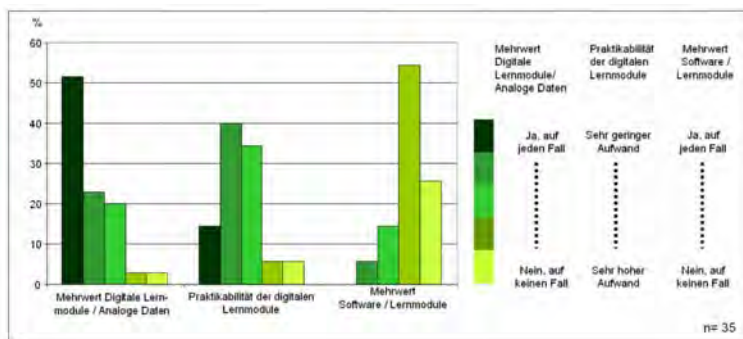
## 4 Evaluierung und Ausblick

Die im FIS Projekt fertiggestellten Lernmodule wurden und werden in Form von eLearning-Modulen auf der Projekthomepage ([www.giub.uni-bonn.de/fis](http://www.giub.uni-bonn.de/fis)) im Sinne von eLearning Modulen 1.0 (s.u.) (KERRES, 2006) den beteiligten Partnerschulen zur Verfügung gestellt, im Unterricht eingesetzt und prozessbegleitend evaluiert. Die Ergebnisse der Evaluierung zeigen, dass das erarbeitete Unterrichtskonzept in der Praxis gut umsetzbar ist. Vor allem wird die enge Kopplung an die bestehenden Lehrpläne von Seiten der Lehrkräfte immer wieder betont, da über

die hohe Relevanz der Themen eine hohe Praktikabilität erzielt wird. Da sich die Unterrichtseinheiten zudem sehr gut in die individuellen Unterrichtskonzepte der Lehrer/Innen integrieren lassen, kann ein nachhaltiger Einsatz gewährleistet werden. Infolgedessen wird die Integration des Themas Fernerkundung als ein positiver Zusatz beschrieben. Den Satellitendaten wird auf der einen Seite eine höhere Anschaulichkeit zugesprochen, die dazu führt, dass Inhalte von den Schüler/Inner besser erlernt und behalten werden. Auf der anderen Seite wird ein erhöhtes Lernspektrum erreicht, da neben den im Lehrplan vorgesehenen Inhalten auch inhaltliche und methodische Aspekte der Fernerkundung behandelt werden können. Entsprechend dieser qualitativen Aussagen wird dem Einsatz der Satellitendaten eine hohe bis sehr hohe Bedeutung zur Erreichung der Lernziele zugewiesen.

Ebenfalls zeigen die Evaluierungsergebnisse, dass der praktische Einsatz der erstellten digitalen Lernmodule im Unterricht gut umsetzbar ist. Die Praktikabilität wird vor allem deshalb als sehr hoch eingestuft, da die Module entweder direkt von CD gestartet werden können bzw. in bestehende schulinterne Lernplattformen integriert werden können, ohne zuvor kommerzielle Software zu installieren. Die befragten Lehrer/Innen weisen den digitalen Lernmodulen sowohl gegenüber dem Einsatz von analogen Satellitenbildern, z.B. in Form von Folien, als auch im Vergleich zu bestehenden Softwarelösungen einen deutlichen Mehrwert zu.

=



=

Abb. 5: Evaluierungsergebnisse=

Als Begründung kann festgehalten werden, dass bestehende, für den Einsatz in der Schule entwickelte Softwarelösungen für den Einsatz in der Schule nicht geeignet sind, da sie in der Regel nicht über einen skalierbaren Ansatz verfügen und häufig nicht intuitiv in der Anwendung sind. Hinzu kommen organisatorische Schwierigkeiten, da Lehrer/Innen häufig nicht berechtigt sind neue Software zu installieren. Somit ist eine langfristige Planung erforderlich, die sich häufig nicht mit dem Schulalltag vereinbaren lässt.

Aufgrund der positiven Rückmeldungen aus der Schulpraxis ist es geplant die bereits erstellten Lernmodule sowohl inhaltlich als auch methodisch zu erweitern und zu ergänzen, um am Ende



eine umfassende Sammlung an fächerverbindenden Lernmodulen für den Schulunterricht bereitstellen zu können.

## 5 Literatur

- ALEAN, J. & BIBER, T., 2005: Entdeckendes Lernen mit Satellitenbildern. *Geographie heute* **235**, S. 35-37.
- ANTE, U. & BUSCHE, D., 1979: Hindernisse beim Einsatz von Satellitenbildern im Geographieunterricht. *Geographische Rundschau* **31** (2), S. 82-86.
- BRUCKER, A., 1981: Sehgewohnheiten ändern. Satellitenbilder als Medien im Geographieunterricht. *Praxis Geographie* **11** (1), S. 2-3.
- FRÖMEL, W., 1981: Die Reaktion von Schülern auf Satellitenbilder. *Praxis Geographie* **11**(1), S. 15-17.
- HASSENPLUG, W., 1996: Satellitenbilder im Erdkundeunterricht. *Geographie heute* **137**, S. 4-11.
- NEUMANN-MAYER, U., 2005: Der Zugang zu Satellitenbildern in der Orientierungsstufe – Probleme und Möglichkeiten. Dissertation an der Universität Kiel. (abrufbar unter [http://e-diss.unikiel.de/diss\\_1657/](http://e-diss.unikiel.de/diss_1657/) (11.04.2008))
- REUSCHENBACH, M., 2006: Fernerkundung im Geographieunterricht: Konzept zur verstärkten Integration von Satellitenbildern in den Geographieunterricht. Beiträge zur Tagung des AK Fernerkundung; Institutsreihe der Universität Osnabrück, Institut für Geoinformatik und Fernerkundung (IGF), S. 79-90.
- REUSCHENBACH, M., 2007a: Neue Wege der Fernerkundung im Geographieunterricht. Tagungsband zur Dreiländertagung der Schweizerischen Gesellschaft für Photogrammetrie, Bildanalyse und Fernerkundung (SGPBF) in Muttenz. Publikation der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., **16**, S. 35 – 40.
- REUSCHENBACH, M., 2007b: Lernen mit Luft- und Satellitenbildern. Folien und Arbeitsmaterialien für die Klassen 5 – 13. Seelze.
- SIEGMUND, A. & MENZ, G., 2005: Fernes nah gebracht – Satelliten- und Luftbildeinsatz zur Analyse von Umweltveränderungen im Geographieunterricht. *Geographie und Schule* **154**, S. 2-10.
- THEISSEN, U., 1986: Das Satellitenbild. Köck, H. (Hrsg.): Grundlagen des Geographieunterrichts. Handbuch des Geographieunterrichts **1**, S. 268-270.
- VOß, K.; GOETZKE, R. & HODAM, H., 2008: Wie wird das Thema „Fernerkundung“ im Unterricht angenommen? – Erste Ergebnisse einer Fallstudie. In: Jekel, Koller & Strobl (Hrsg.): Lernen mit Geoinformationen **III**. S.8-14.

## 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 Förderkennzeichen 50EE0615 gefördert. Den Projektpartnern aus den verschiedenen Schulen gilt ein herzlicher Dank für die konstruktive Diskussion und die Umsetzung des entwickelten Konzeptes im Unterricht.

# MULTIDODGING: Ein effizienter Algorithmus zur automatischen Verbesserung von digitalisierten Luftbildern

MARTIN DRAUSCHKE<sup>1</sup>, WOLFGANG FÖRSTNER<sup>1</sup> & ANSGAR BRUNN<sup>2</sup>

*Zusammenfassung: Wir haben ein effizientes, automatisches Verfahren zur Verbesserung von digitalisierten Luftbildern entwickelt. Das Verfahren MULTIDODGING dient im Kontext der visuellen Aufbereitung von historischen Aufnahmen aus dem 2. Weltkrieg. Bei der Bildverbesserung mittels MULTIDODGING wird das eingescannte Bild zunächst in sich nicht überlappende rechteckige Bildausschnitte unterteilt. In jedem Bildausschnitt wird eine Histogrammverebnung durchgeführt, die im Allgemeinen zu einer Verstärkung des Kontrasts führt. Durch die regionale Veränderung des Bildes entstehen sichtbare Grenzen zwischen den Bildausschnitten, die durch eine Interpolation entfernt werden. In der Anwendung des bisherigen Verfahrens hat sich gezeigt, dass der Kontrast in vielen lokalen Stellen zu stark ist. Deshalb kann zum Abschluss die Spannweite der Grauwerte zusätzlich reduziert werden, wobei diese Kontrastanpassung regional aus den Gradienten im Bildausschnitt berechnet wird. Dieser Beitrag beschreibt und analysiert das Verfahren im Detail.*

## 1 Einleitung

Im 2. Weltkrieg hat die Luftaufklärung der Alliierten Streitkämpfe Millionen von Luftbildern über Deutschland aufgenommen. Damals dienten sie zur Beobachtung der feindlichen Stellungen und Truppenbewegungen sowie dokumentierten den Erfolg bzw. Misserfolg eigener militärischer Operationen.

Zu Beginn der 1990er Jahre wurden diese Bilder deutschen Behörden zur zivilen Nutzung zugänglich gemacht, seit 2004 ist ein weiteres Archiv mit Millionen Luftbildern verfügbar (CARLS & MÜLLER, 2007). In Nordrhein-Westfalen unterstützen die Aufnahmen seitdem u. a. die Beseitigung von Kampfmitteln des 2. Weltkriegs sowie die Identifikation von durch Kampfmittel des 2. Weltkriegs ausgelösten Altlasten im Boden (DRAUSCHKE et al., 2007). Um diese mehreren 100.000 Luftbilder effektiv nutzen zu können, sollen sie zukünftig digital ausgewertet werden. Aus diesem Grund werden sie zurzeit serienmäßig eingescannt. Das Scannen in Nordrhein-Westfalen erfolgt mit einer Grauwerttiefe von 12 Bits und 21 µm Pixelgröße, d.h. sowohl mit einer hohen radiometrischen als auch mit einer hohen geometrischen Auflösung. Aus ökonomischen Gründen wird das Scannen seriell und ohne menschliche Interaktion durchgeführt. Dies hat zur Folge, dass ein großer Teil der digitalisierten Aufnahmen sehr kontrastarm und somit für eine visuelle Inspektion durch den Menschen ungeeignet ist. Eine automatische Bildverbesserung soll dieses Problem beheben.

---

1) Martin Drauschke, Wolfgang Förstner, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Institut für Geodäsie und Geoinformation, Lehrstuhl für Photogrammetrie, Nußallee 15, 53115 Bonn; E-Mail: martin.drauschke@uni-bonn.de, wf@ipb.uni-bonn.de

2) Ansgar Brunn, Hochschule für Angewandte Wissenschaften - Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt, Studiengang Vermessung und Geoinformatik, Professur für Photogrammetrie und Geoinformatik, Röntgenring 8, 97070 Würzburg; E-Mail: ansgar.brunn@fhws.de

## 2 Problemstellung

Aufgrund des seriellen Scannprozesses ist ein großer Teil der digitalisierten Luftbilder für die visuelle Inspektion ungeeignet. Abb. 1 zeigt drei Scans der vorliegenden Aufnahmen und ihre Histogramme. Die Bilder werden zwar nach einer Quantisierung auf 8 Bit angezeigt, aber die Histogramme zeigen deutlich, wie extrem unterschiedlich die Grauwerte in allen drei Bildern verteilt sind. Gesucht ist nun ein effizientes, automatisches Verfahren, mit dem das Bild visuell gut interpretiert werden kann.



Abb. 1: Digitalisierte Luftbilder und ihre Histogramme.

Dodging ist ein englischer Begriff, der in Bezug auf die Bearbeitung von analogen Photographien verwendet wird. Im Allgemeinen wird damit das Aufhellen des Bildpositivs in Verbindung gebracht. In der Dunkelkammer entspricht dies der Reduzierung des Lichts auf dem Bildnegativ, so dass das Negativ dunkler wird.

In ersten Versuchen haben wir versucht, die Bilder mit verschiedenen am Markt verfügbaren Bildverbesserungsverfahren sowie einem eigenen globalen Ansatz zu verbessern, siehe (DRAUSCHKE et al., 2007). Jedoch erzielten alle Versuche mit einem globalen Verfahren unbefriedigende Ergebnisse: Entweder waren große Teile des Bildes immer noch zu hell bzw. andere schon zu dunkel, oder wir erhielten ein stark binarisiertes Bild. Wir führen das Scheitern unserer globalen Ansätze auf die lokal unterschiedliche Belichtung der historischen Aufnahmen zurück, die aufgrund der Aufnahmesituation entstanden ist.

In unserer weiteren Arbeit haben wir daher ein regional arbeitendes Verfahren entwickelt, das sowohl effizient ist als auch gute Ergebnisse liefert. Ein ähnlicher Ansatz von ZHAO & LEI (2006) zerlegt ebenfalls das Bild in einzelne Blöcke, verbessert lokal den Kontrast und verwischt die Blockgrenzen mittels bilinearer Interpolation. Während dieses Verfahren nur bei Aufnahmen

handelsüblicher Digitalkameras bearbeiten kann, wurde unser Algorithmus speziell für radiometrisch und geometrisch hoch aufgelöste Bilder entwickelt.

Wegen der Aufteilung des Bildes in verschiedene Bildausschnitte und die in diesen Teilen durchgeführte Helligkeitsanpassung des Bildes haben wir unser Verfahren MULTIDODGING getauft. Wir werden es mit allen seinen Teilschritten im folgenden Abschnitt vorstellen und detailliert beschreiben.

### 3 MULTIDODGING-Algorithmus

In diesem Abschnitt stellen wir den Algorithmus MULTIDODGING ausführlich vor. In Alg. 1 wird der Ablauf des Algorithmus mit allen wesentlichen Schritten dargestellt, die im Folgenden beschrieben werden.

ALGORITHMUS  $B_{aus} = \text{MULTIDODGING}(B_{ein}, param)$

// Eingabe:  $B_{ein}$ : 16-Bit-Grauwertbild,  $param$ : Menge der Parameter, das sind  
 // Größe der Bildausschnitte, Wahl der Interpolationsmethode, Parameter für die  
 // stärkste Kontrastanpassung sowie die Ausgabe als 16- oder 8-Bit-Grauwertbild.

// Ausgabe:  $B_{aus}$ : 16- oder 8-Bit-Grauwertbild

1. Einteilung des Bildes in regelmäßige, rechteckige Bildausschnitte  $P_i$
2. FÜR jeden Bildausschnitt  $P_i$ 
  - a. Berechne Histogramm  $H_i$  und kumulatives Histogramm  $K_i$
  - b. Berechne regionale Histogrammverebnung  $T_i$
3. SWITCH Interpolationsmethode
  - a. *Nächster* Bildausschnitt: keine Interpolation
  - b. *Bilinear*: Bestimme die vier nächstgelegenen Bildausschnitte und interpoliere mit linearen Funktionen zwischen ihnen
  - c. *Bikubisch*: Bestimme die 16 nächstgelegenen Bildausschnitte und interpoliere mit kubischen Funktionen zwischen ihnen
4. FÜR jeden Bildausschnitt  $P_i$ 
  - a. Berechne maximalen Gradienten und Median
  - b. Berechne lineare Transformation  $L_i$  zur Kontrastanpassung
5. Wiederhole Interpolation

Alg. 1: MULTIDODGING-Algorithmus.

### 3.1 Ein- und Ausgabe des Algorithmus

Das Verfahren des MULTIDODGINGS wurde zur visuellen Verbesserung von eingescannten Luftbildern entwickelt. Als Eingabe wird ein Grauwertbild mit einer radiometrischen Auflösung von 16 Bit erwartet. Neben dem Eingabebild werden auch einige Parameter dem Algorithmus übergeben, um diesen möglichst variabel gestalten zu können. Dies ist einerseits die Größe der Blöcke, in die das Bild im ersten Schritt zerlegt wird. Zwei weitere Parameter werden für die Wahl der Interpolationsmethode sowie die Stauchung der Histogramme gebraucht.

Ausgegeben wird wieder ein Grauwertbild, dessen radiometrische Auflösung entweder 8 oder 16 Bit sein kann. Zudem kann das Programm Statistiken zum Eingabebild und den einzelnen Schritten des Algorithmus anzeigen.

### 3.2 Einteilung des Bildes in Blöcke

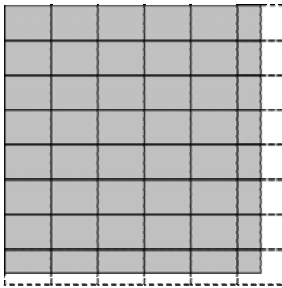


Abb. 2: Grauwertbild (grau hinterlegt) und regelmäßige Einteilung in Blöcke.

Der MULTIDODGING-Algorithmus wurde speziell zur Verbesserung von Luftbildern entwickelt. Wenn unser Ansatz mit einer Histogrammverebnung global ausgeführt wird, d. h. es für das gesamte Bild eine einheitliche Grauwerttransformation gibt, dann führt dies zu regional teilweise sehr unbefriedigenden Ergebnissen, siehe Abb. 3 (links).

Aus diesem Grund arbeiten wir mit regional definierten Histogrammverebnungen. Dies erreichen wir, indem wir das Eingabebild  $B_{ein}$  in regelmäßig angeordnete, rechteckige Bildausschnitte zerlegen, die wir auch Blöcke  $P_i$  nennen. Für diese Zerlegung des Bildes gelten die beiden Bedingungen:

$$B_{ein} = \cup P_i, \quad (1)$$

d. h. die Blöcke decken das Bild vollständig ab, und

$$P_i \cap P_j = \emptyset, i \neq j, \quad (2)$$

d. h. die Blöcke überlappen sich nicht.

Die Einteilung des Bildes in Blöcke beginnt in der linken oberen Ecke. Von dort aus werden die Blöcke im Gitter angeordnet. Diese Array-Struktur ist von uns bewusst gewählt worden, weil auf diese Weise auf alle weiteren block-bezogenen Datenstrukturen effizient zugegriffen werden kann, so z. B. auf die Histogramme und Grauwerttransformation des nächsten Schrittes. Die Blockgröße  $|P_i|$  ist bei allen Teilen gleich, außer am rechten und unteren Rand. Dort führt die Begrenzung des Bildes zu kleineren Blöcken, siehe Abb. 2. Wir haben uns zu dieser Einteilung des Bildes entschieden, um die Auswirkung der Blockgröße auf das Gesamtergebnis bei verschiedenen Bildern testen zu können. Prinzipiell kann auch die vom Anwender gewählte Blockgröße automatisch so angepasst werden, dass alle Blöcke dieselbe Größe haben.

Da die Histogramme  $2^{16} = 65.536$  Einträge enthalten, müssen auch die Blöcke eine ausreichende Größe haben. Wegen des mehrfachen Vorkommens einzelner Grauwerte sind Blöcke der Größe von etwa  $1000 \times 1500$  Pixel zu empfehlen.

### 3.3 Regionale Histogrammverebnung

Der wesentliche Bestandteil des MULTIDODGINGS ist die block-bezogene Histogrammverebnung. Wegen der Blockgrößen von ca. 100.000 bis zu mehreren Millionen Pixeln bezeichnen wir diese Grauwerttransformation als regional. Dazu wird in jeder Region, d. h. in jedem Block  $P_i$  das Histogramm  $H_i$  und das kumulative Histogramm  $K_i$  bestimmt. Aus diesen beiden Strukturen kann dann die Transformation der Grauwerte  $T_i$ , die Histogrammverebnung, berechnet werden:

$$T_i(g) = k_0 \cdot K_i(g) - H_i(0) \quad \text{mit} \quad k_0 = \frac{2^{16}}{|P_i| - H_i(0)} \quad (3)$$

Da jede Histogrammverebnung separat in einem Block durchgeführt wird, treten an den Grenzen zwischen den Blöcken starke Grauwertunterschiede auf, die die Grenzen der Blöcke



Abb. 3: Histogrammverebnung: global (links) und regional ohne Interpolation (rechts).

erkennen lassen, siehe Abb. 3 (rechts). Aus diesem Grund wird in einem der regionalen Histogrammverebnung nachfolgenden Schritt zwischen den Blöcken interpoliert.

Ohne Interpolation wird für jedes Pixel  $(x,y)$  die Transformationsvorschrift desjenigen Blocks verwendet, in dem sich das Pixel befindet (*nächster Block*). Die Grauwerte des Ausgabebilds lassen sich dann für  $(x,y) \in P_i$  wie folgt berechnen:

$$B_{aus}(x,y) = T_i(B_{ein}(x,y)). \quad (4)$$

Wenn stattdessen bilinear oder bikubisch interpoliert werden soll, werden mehrere *nächste Blöcke* bzgl. des Pixels  $(x,y)$  benötigt. Die bilineare Interpolation ist schematisch in Abb. 4 dargestellt. Wenn  $(x_1,y_1)$  bis  $(x_4,y_4)$  die Mittelpunkte der vier *nächsten Blöcke* von

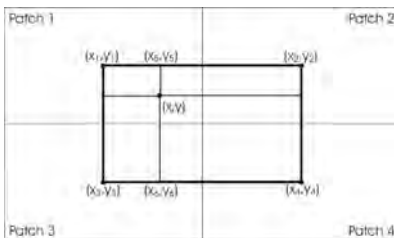


Abb. 4: Die Positionen der Mittelpunkte  $(x_1,y_1)$  bis  $(x_4,y_4)$  der vier *nächsten Blöcke* werden zur Bestimmung der Gewichte der bilinearen Interpolation von  $(x,y)$  verwendet.

$(x,y)$  sind, dann ergibt sich für den transformierten Grauwert der Wert:

$$B_{aus}(x, y) = \sum_{i=1,4} \varpi_i T_i(B_{ein}(x, y)) \quad \text{mit} \quad \varpi_i = \frac{|x_{5-i} - x| \cdot |y_{5-i} - y|}{|x_4 - x_1| \cdot |y_4 - y_1|}. \quad (6)$$

Die bilineare Interpolation verwendet lineare Funktionen, während die bikubische Interpolation mit Polynomen dritten Grades arbeitet. Dadurch entstehen glattere Übergänge zwischen den Blöcken, allerdings erhöht sich der Rechenaufwand erheblich, da die bikubische Interpolation die Werte aus den 16 *nächsten Blöcken* verlangt.

Wir haben beide Interpolationsmethoden, die bilineare und die bikubische, implementiert. Um die Resultate qualitativ besser miteinander vergleichen zu können, haben wir Differenzbilder zwischen den Ausgaben der beiden Interpolationen berechnet, siehe Abb. 5. Die Unterschiede sind so gering, dass erst nach einer Grauwerttransformation mit entsprechender Kontrastverbesserung die Unterschiede sichtbar werden. Da sich beide Interpolationsmethoden nur geringfügig in den Ausgaben unterscheiden, aber das bikubische Verfahren einen deutlich höheren Rechenaufwand hat, empfehlen wir die Verwendung der bilinearen Interpolation.

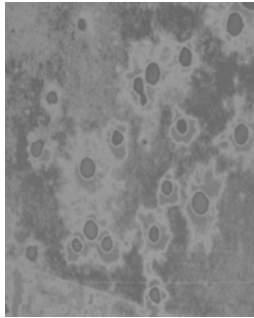
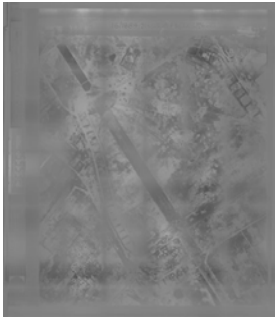


Abb. 5: Kontrastverbesserte Differenzbilder zwischen den Ausgaben nach bilinearer und bikubischer Interpolation. Unterschiede sind vor allem an den Blockübergängen sowie an einigen lokalen Bildstrukturen, z. B. bei den Bombentrichtern erkennbar.

Die technischen Details von Histogrammverebnung und Interpolation seien hiermit ausreichend vorgestellt. Bei weiterem Bedarf empfehlen wir einführende Lehrbücher zur Bildverarbeitung, wie z. B. PRATT (1978).

### 3.4 Reduzierung des Kontrasts

Ein Resultat der Bildverbesserung nach Ausführung der regionalen Histogrammverebnungen mit anschließender bilinearer Interpolation ist in Abb. 6 (links) dargestellt. Die abgebildeten Objekte sind sehr gut von einander zu unterscheiden. Dennoch hat sich in der Praxis gezeigt, dass bei zahlreichen Objektübergängen sehr starke Kontraste auftreten.

Die Verringerung der lokal sehr großen Grauwertunterschiede im Bild kann durch eine Kontrastanpassung erfolgen, bei der das Histogramm gestaucht wird. Da der Kontrast im Bild stark schwankt, verfolgen wir wieder den regionalen Ansatz. Die Reduzierung des Kontrasts in einem Bild wird durch eine lineare Transformation  $L_i$  der Grauwerte in Block  $P_i$  realisiert. Den Stauchungsfaktor  $s_i$  dieser Transformationen leiten wir aus den Gradientenstärken innerhalb des Blocks ab, die wir mit Hilfe des Sobel-Operators berechnen. Der maximale Gradient eines Blocks sei  $M_i$ , und der Median der Gradientenstärken eines Blocks wird mit  $m_i$  bezeichnet. Den

Median berechnen wir effizient mit dem Algorithmus von HOARE (1971). Wir erhalten als lineare Transformation zur Reduzierung des Kontrasts:

$$L_i(g) = s_i \cdot (g - 32768) + 32768 \quad \text{mit} \quad s_i = \frac{M_i - m_i}{M_i} \in [0,1], \quad (7)$$

womit der mittlere Grauwert 32768 wieder auf sich selbst abgebildet wird und das gestauchte Histogramm nur noch  $s_i$  mal so viele Einträge hat wie das verebnete. Eine zu starke lokale Stauchung wird durch das Programm verhindert, da es zu kleine Werte von  $s_i$  durch einen übergebenen Parameter ersetzt.

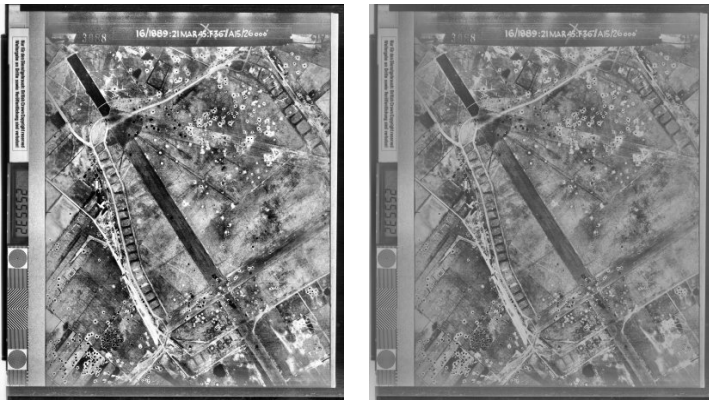


Abb. 6: Resultate des MULTIDODGINGS mit bilinearer Interpolation sowie ohne (links) bzw. mit (rechts) Reduzierung des Kontrasts. Hier wurde eine maximale Stauchung mit  $s_i \geq 0.4$  verwendet, so dass der Kontrast zur Veranschaulichung des Vorgangs sehr stark reduziert wird.

## 4 Anwendung des MULTIDODGING-Algorithmus

Neben der visuellen Qualität des Ausgabebilds haben wir bei der Implementierung des MULTIDODGINGS auch auf die Robustheit sowie die Performanz des Programms geachtet. Die Programmschritte Berechnung der regionalen Histogramme, die bilineare Interpolation sowie die Berechnung der Gradienten werden in  $O(N)$  realisiert, wobei  $N$  die Anzahl der Pixel im Bild darstellt. Alle anderen Programmteile hängen nur noch linear von der Anzahl der Blöcke  $P$  sowie von der Anzahl der Grauwerte  $G$  ab, werden somit in  $O(P \cdot G)$  realisiert, was vernachlässigbar ist. Daher hat der Algorithmus des MULTIDODGINGS eine Laufzeit von  $O(N)$ .

Unser Verfahren erreicht die Geschwindigkeit des Scannens, so dass eine weitere Optimierung für die Verbesserung von Luftbildern aus dem 2. Weltkrieg nicht erforderlich ist. Sollten andere



Verfahren höhere Anforderungen haben, kann unser Algorithmus durch eine Implementierung mit parallelen Algorithmen zusätzlich beschleunigt werden.

#### **4.1 Detektion von Bombentrichtern**

Wie eingangs erwähnt, bilden hunderttausende Luftbilder die Grundlage für die Beseitigung von Kampfmitteln aus dem 2. Weltkrieg in Nordrhein-Westfalen. Hier wird das MULTIDODGING bereits seit über einem Jahr erfolgreich eingesetzt. In diesem Zusammenhang ergab sich auch eine weitere Anwendung für das Verfahren: Es wird als Vorverarbeitungsschritt bei der Detektion von Bombentrichtern eingesetzt, um aus den Bildern Risikokarten zu erstellen (JENSEN, 2008).

#### **4.2 Weitere mögliche Anwendungen**

Da das MULTIDODGING lediglich große Bilder mit einer hohen radiometrischen Auflösung voraussetzt, ist es auch für viele andere Anwendungsgebiete im Zusammenhang mit Bildverbesserung einsetzbar. Eine stellt z. B. die visuelle Aufbereitung von Nachtaufnahmen dar. An dieser Stelle wollen wir aber noch einmal darauf hinweisen, dass unsere zufrieden stellende Bildverbesserung vor allem auf die hohe radiometrische Auflösung des Scannings der Luftbilder zurückzuführen ist. Eine vorherige Quantisierung der Aufnahmen auf 8 Bit verschlechtert eine qualitativ hochwertige Kontrastverbesserung deutlich.

Die verfügbaren Photogrammetrischen Scanner liefern deutlich mehr als 8 bit Datentiefe. Daher bietet unser Verfahren für viele photogrammetrische Anwendungen, die Möglichkeit durch den Einsatz einer höheren radiometrischen Scanauflösung den manuellen Einstellungs- und Nachbereitungsaufwand photogrammetrischer Scans deutlich zu reduzieren. Weitere empirische Untersuchungen sind hierzu jedoch noch notwendig.

### **5 Zusammenfassung**

Wir haben einen effizienten Algorithmus zur automatischen Kontrastverbesserung von Luftbildern vorgestellt, der aus einer regionalen Histogrammverebnung mit anschließender bilinearer Interpolation sowie einer leichten Kontrastreduktion besteht. Bei Interesse an unserem Verfahren, können Sie gern Kontakt mit uns aufnehmen.

### **6 Literaturverzeichnis**

- CARLS, H.-G. & MÜLLER, W., 2007: Die Aktualität der Vergangenheit – der Kriegsluftbestand “JARIC“ in der modernen Kampfmittelbeseitigung. PFG 2007 (2), S. 121-129.
- DRAUSCHKE, M.; BRUNN, A.; KULSCHEWSKI, K. & FÖRSTNER, W., 2007: Automatic Dodging of Aerial Images. In: Publikationen der DGPF, Band 16, S. 173-180.
- HOARE, C., 1971: Proof of a Program: FIND. In: Communications of the ACM, **14** (1), S. 39-45.
- JENSEN, L., 2008: Automatische Detektion von Bombentrichtern. Bachelorarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn.
- PRATT, W., 1978: Digital Image Processing, Wiley & Sons, New York.
- ZHAO, J. & Lei, S., 2006: Automatic Digital Image Enhancement for Dark Pictures. Proceedings of ICASSP 2006, Vol. 2, Toulouse, France, S. 953-956.

# Analysis of Road Networks after Flood Disasters using Multi-sensorial Remote Sensing Techniques

DANIEL FREY<sup>1</sup> & MATTHIAS BUTENUTH<sup>2</sup>

*Abstract: A major problem to support first aid after natural disasters is the accessibility of the affected regions. Particularly, the trafficability of roads plays a decisive role. Currently, it is very difficult to obtain information for large areas in near-realtime. Remote sensing techniques provide the opportunity to detect, if roads are drivable or not. We focus on flood disasters, because they are the most frequently natural hazards in Germany. In this paper, a system is presented which automatically infers probabilities for road segments using a combination of up to date remote sensing data and already existing GIS data. Data sources are optical satellite images (IKONOS) and GIS data (ATKIS). The status of the road segments is computed in the presented system exploiting the radiometric information of the satellite images. The assessment of the road segments is conducted by means of Gaussian mixture model. The roads are divided into three groups: trafficable, possibly trafficable and flooded. Finally, automatic generated results are shown and compared with manually derived reference. Concluding remarks are given at the end to point out further investigations.*

## 1 Introduction

In recent years Germany was affected by several floodings. Particularly, the floodings occurring 1997 at the Oder and 2002 at the Elbe were two extreme incidents. However, the number of flood disasters has considerably grown worldwide (KUNDZEWICZ 2003). There are several reasons for the increasing flood risk: changes in terrestrial systems (land-cover change, river regulation, channel straightening), changes in socio-economic systems (growing wealth in flood-prone areas) and changes in climate (intense precipitation, seasonality) (KUNDZEWICZ 2005). Due to this situation, the development of strategies for a fast reaction is an important issue. A decisive component to perform disaster management is the accessibility of the affected area, i.e. having up-to-date information about the infrastructure. This knowledge is necessary to deliver relief items as well as to evacuate humans from flooded areas. Remote sensing techniques provide an opportunity to gain this information. By means of currently available satellite systems, it is possible to infer up-to-date and large-area information about the functionality of infrastructure. For this reason, a system using remote sensing data and GIS data is developed, which evaluates automatically the trafficability of the road network.

---

<sup>1</sup> Daniel Frey, Technische Universität München, Lehrstuhl für Methodik der Fernerkundung, Arcisstr. 21, D-80333 München, Email: daniel.frey@bv.tum.de

<sup>2</sup> Matthias Butenuth, Technische Universität München, Lehrstuhl für Methodik der Fernerkundung, Arcisstr. 21, D-80333 München, Email: matthias.butenuth@bv.tum.de

## 2 State of the art

Using remote sensing data in order to monitor floodings was already studied in the year 1969 (MILFRED et al. 1969). However, due to the technical progress and the increasing amount of sensors the possibilities of applications are multiplied. In particular, different spectral ranges and the improved resolution provide an opportunity to derive more detailed information about flooded areas. But despite of numerous technological advances the process of semantic data acquisition still needs lot of manual interaction of human operator to yield results relevant for practical applications, which is of course both time consuming and expensive (BUTENUTH & Hinz 2008). In this article geometric high-resolution images are used, being able to display the infrastructure in detail. Having satellite images of flooded areas, the main focus lies on the detection of the flooded regions. For radar images (KUEHN et al. 2002) as well as for optical images (GÄHLER et al. 2008) it is possible to extract flood masks via classification. Additionally, further information can be gained combining different sensors (YONGHUA et al. 2007), (EHLERS & KLONUS 2008). However, there is a lack of methods, which assess the roads on trafficability (MORAIN & KRAFT 2003). High-resolution satellite images enable the development and implementation of methods for an efficient assessment of road infrastructure.

## 3 Model and strategy

Generally, the assessment of roads concerning their trafficability should require only little information. The developed system is based on a semantic model incorporating a complete framework of potential available data sources. Using the combination of different data sources a probability model can be derived in order to assess the roads.

### 3.1 Used data

In Figure 1 the used IKONOS-scene is shown, which was acquired during the Elbe flooding in Germany near Dessau in 2002. The pixel-size of the panchromatic channel is 1 meter and in color-channels 4 meters. This scene has a very complex characteristic: Beside settlements with both urban and rural character, there are wide forest and agricultural areas. In addition the appearance of traffic routes varies from small field paths to highways. The scene can roughly divided into a flooded northern and a non-flooded southern part.

The second used data source are GIS-data ATKIS (official topographic cartographic information system). This data provides a complete map of the existing road network with a geometric accuracy of +/- 3 meters (cf. Fig. 1).



Fig. 1: IKONOS-scene of the Elbe flooding 2002 in Dessau (left); ATKIS road-data (right).  
[Source: Federal Agency for Cartography and Geodesy Sachsen-Anhalt]

Besides the satellite image data and the GIS-data an additionally digital elevation model is given. In case of a flooding the elevation model can contribute important information, since the flooded area is naturally dependent on the height (cf. Fig. 2). In Germany, digital elevation models are available with a grid of 10m x 10m and geometric accuracy of  $\pm 1\text{m}$ . Partly, in case of LIDAR-data, even better models are available. Digital elevation models on a worldwide scale are available, too, but the resolution is mostly worse.

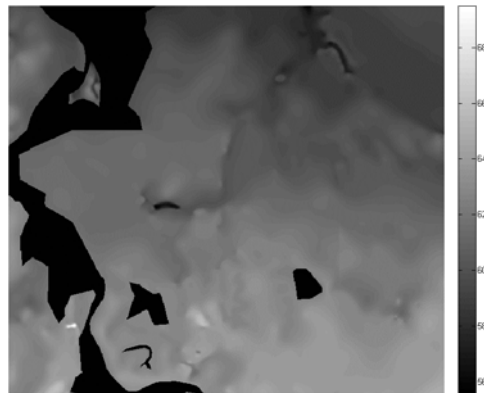


Fig. 2: Digital elevation model of IKONOS-scene. Scale describes height above sea level [m].  
[Source: Federal Agency for Cartography and Geodesy Sachsen-Anhalt]

### 3.2 Data integration and classification

After geocoding an image with five channels is given: The first four layers contain the spectral channels of the IKONOS image (red, green, blue and near infrared) and the fifth layer contains the digital elevation model. To enhance the geometric accuracy of the color channels a pansharpening has been carried out (NIKOLAKOPOULOS 2004). On the basis of the five layers the assessment of each road segment, concerning its trafficability is computed. The road segments are assigned into three categories:

1. Trafficable
2. Flooded
3. Possibly flooded

The allocation into the three categories results from a supervised classification in combination with fuzzy functions. At the beginning, training samples of four different classes are selected: “Road”, “Water”, “Forest” and “Clouds”. The classes “Water”, “Forest” and “Clouds” have in common that the original road is occluded. However, in order to assess the complete road network also the occluded roads have to be included in the approach. Every ATKIS road segment is assessed to one of the above-mentioned classes by means of a supervised classification, using the four spectral channels of the IKONOS scene. The classification has been carried out by means of multivariate Gaussian distribution. Every classified road segment has a probability  $p(i)$ , which describes the belonging to a class  $i$ . Using the Gaussian distribution the  $k$ -sigma probability is used. These probabilities are combined with fuzzy functions (ZADEH 1965).

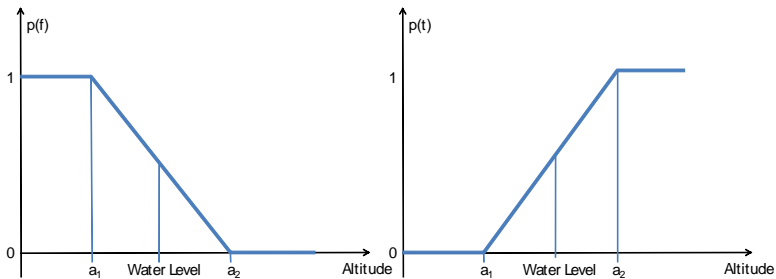


Fig. 3: Fuzzy functions for flooded roads (left) for trafficable roads (right)

The fuzzy functions are used to include the information of the digital elevation model. The functions, which are derived from potential water levels, describe the probability of a flooded road  $p(f)$  or trafficable road  $p(t)$  (cf. Fig. 3). This simplified model only depends on the height and does not contain any information about flow models or barriers as banks. Nevertheless, the additional information can improve the assessment of the roads. It is assumed, that roads below the height  $a_1$  are definitely flooded  $p(f)=1$  and above the height  $a_2$  are definitely trafficable  $p(t)=1$ . Between these thresholds a linear distribution is applied; the middle situates the water

level. The combination of the fuzzy functions with the probabilities belonging to a class  $p(i)$  is performed by the following rules of the fuzzy-set-theory: Here,  $p(i_w)$  and  $p(i_r)$  indicate the sigma probability that a road segment belongs to a class  $i_w$  (Water) or  $i_r$  (Road):

$$\text{For } p(t), p(f) < a_1: \quad \begin{aligned} p(f, i_w) &= \max(p(f), p(i_w)) = p(f) = 1 \\ p(t, i_r) &= \min(p(t), p(i_r)) = p(t) = 0 \end{aligned}$$

$$\text{For } a_1 < p(t), p(f) < a_2: \quad \begin{aligned} p(f, i_w) &= p(f) \cdot p(i_w) \\ p(t, i_r) &= p(t) \cdot p(i_r) \end{aligned}$$

$$\text{For } p(t), p(f) > a_2: \quad \begin{aligned} p(f, i_w) &= \min(p(f), p(i_w)) = p(f) = 0 \\ p(t, i_r) &= \max(p(t), p(i_r)) = p(t) = 1 \end{aligned}$$

The road is assigned to the category “Flooded”, if the probability  $p(f, i_w)$  exceeds an empirical determined threshold  $t_1$ . The road is assigned to the category “Possibly flooded”, if  $p(f, i_w)$  is less than  $t_1$ . The probability  $p(t, i_r)$  is treated in an analogous manner. The road is assigned to the category “Trafficable” if  $p(t, i_r)$  exceeds a determined threshold  $t_2$ . Otherwise, the road is again assigned to the category “Possibly flooded”. The road segments which are classified as “Forest” or “Clouds” are assigned to the categories in the following way:

$$\begin{aligned} a_r < a_1 &\Rightarrow \text{Category „Flooded“} \\ a_1 < a_r < a_2 &\Rightarrow \text{Category „Possibly flooded“} \\ a_r > a_2 &\Rightarrow \text{Category „Trafficable“} \end{aligned}$$

Here,  $a_r$  indicates the average height of the roads. The complete schematic structure of the assessment is depicted in Figure 4.

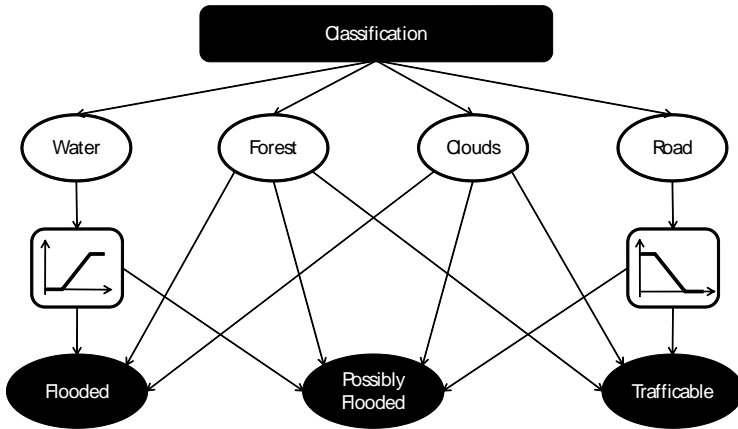


Fig. 4: Schematic structure of the assessment

## 4 Results and evaluation

The Combination of the classification with the fuzzy functions leads to the result shown in Figure 5. The red lines define roads, which are assigned to the category “Flooded”. The Yellow lines belong to the category “Possibly flooded” and the green ones to “Trafficable”. In order to get a quantitative evaluation, reference data are acquired using the satellite image (cf. Fig. 5). An operator assigned each road segment manually to one of the three categories. If the automatic generated assessment is compared with the reference data a large correlation is observed. The forest area on the right bottom corner should be observed in more detail, because of the different assessment. It is impossible to get direct information of the trafficability, due to the occlusion of the roads by the forest. Therefore, the digital elevation model is the decisive criteria. The region in the bottom is assigned to “Trafficable” and the upper part is allocated to “Possibly flooded”. The assignment of the whole area to the category “Trafficable” is only possible if global context information is introduced.

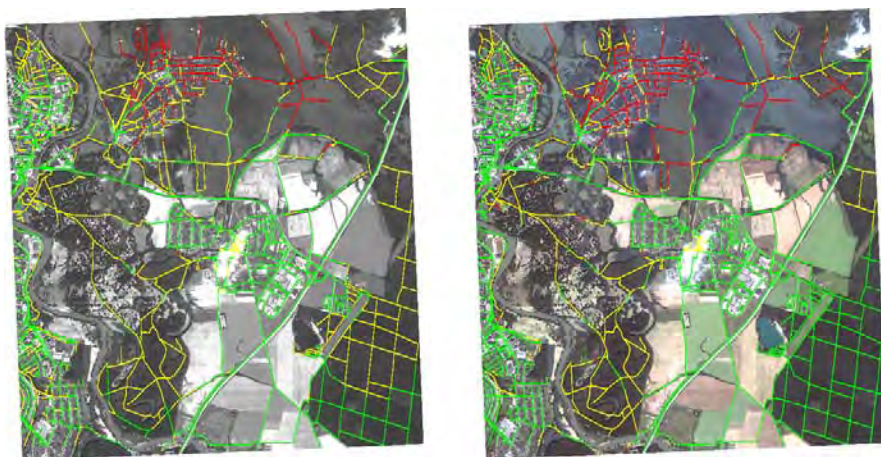


Fig. 5: Automatic assessment (left), manually derived result (right);  
[red = flooded; yellow = possibly flooded; green = trafficable]

The following evaluation compares the automatic method, with the manually generated reference. We assume that the reference is error-free. If the three categories of each data are compared  $3^2 = 9$  possible combinations as shown in Table 1 are derived. Here, F defines “Flooded”, P “Possibly flooded” and T “Trafficable”. Every possible combination has a semantic meaning. Furthermore, Table 1 shows the relative frequency of the different combinations. In order to evaluate the automatic algorithm, a simplification of the combinations is shown in Table 2.

<i><b>Result</b></i>	<i><b>Reference</b></i>	<i><b>Evaluation</b></i>	<i><b>Semantic meaning for relief actions</b></i>	<i><b>Relative frequency</b></i>
F	F	Correct	Road is definitely flooded.	7.71 %
F	P	Possibly Wrong	Possibly a detour has to be accepted.	2.84 %
F	T	Wrong	A detour has to be accepted.	0.16 %
P	F	Manual Control	A manual review is necessary.	5.91 %
P	P	Correct	No predication is possible.	19.82 %
P	T	Manual Control	A manual review is necessary.	10.65 %
T	F	Wrong	Routed to a dead-end street.	0.11 %
T	P	Possibly Wrong	Possibly routed to a dead-end street.	2.26 %
T	T	Correct	Road is definitely trafficable.	50.53 %

Tab. 1: Semantic meaning of possible combinations of assignment

<i><b>Possible Assignments</b></i>	<i><b>result</b></i>
Correct assignment	78,06 %
Manuel control necessary	16,56 %
Possibly correct assignment	5,10 %
Wrong assignment	0,27 %

Tab. 2: Results of the described approach

The presented approach achieves a correct assignment for 78% of the road segment. A very small value of false assignments is derived. This result is deteriorated due to the 5% of possibly wrong assignments. Less than 1/5 of all road segments (17%) should be controlled manually. Furthermore, it has to be mentioned that the automatic approach uses more information than the operator: The manual reference is generated only by means of the RGB-Image. In contrast, the automatic approach additionally uses further height information. For this reason it is possible, that the automatic approach produces better results than the manual generated reference. The example in Figure 6 should make this clear. The operator assigned the roads to the category “Possibly Flooded” due to occlusions by trees (cf. Fig. 6). By means of height information the automatic approach assigns the roads to “Flooded”.



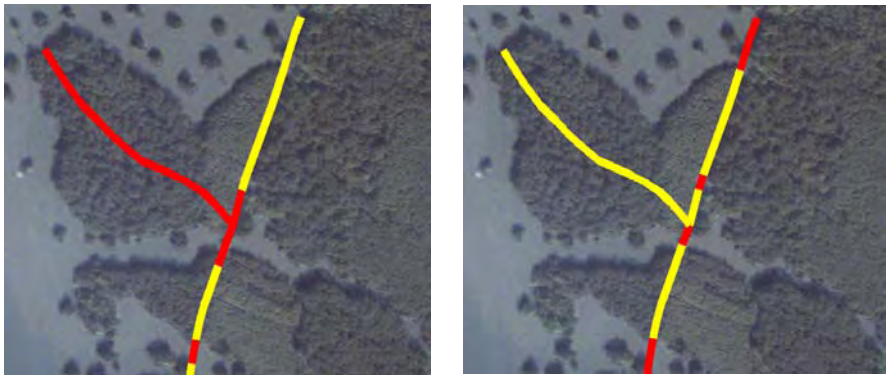


Fig. 6: Comparison of automatic assessment (left) with manually generated result (right);  
[red = flooded; yellow = possibly flooded]

Besides the reliability, the efficiency plays a decisive role. In particular in time-critical applications, as the first aid after natural hazards, a rapid method is required. Our scene covers an area of 25 km<sup>2</sup> with 5483 road segments. The automatic approach needs on a usual PC about one minute. In contrast, the manual generated assessments last about three hours. Here the increase of the efficiency by an automatic method can be seen.

## 5 Outlook

In order to improve the system, further solid information are necessary. On the one hand, the manual reference which was generated using image data, is not exact ground truth. But it is also difficult to get 100% exact information about the flooded areas afterwards. On the other hand, further scenes with different appearances of the flooded areas have to be studied in order to improve the evaluation of the approach. Furthermore, the embedding of additional geoinformation and information on topology could lead to an improvement of the results. Finally, a model will be developed which includes the integration of further sensors as TerraSAS-X.

## 6 References

- BUTENUTH, M. & HINZ, S., 2008: Verification of intact road networks in satellite imagery for crisis applications. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation*, **17**, pp. 111-118.
- BUTENUTH, M.; GÖSSELN, G. V.; TIEDGE, M.; HEIPKE, C.; LIPECK, U. & SESTER, M., 2007: Integration of Heterogeneous Geospatial Data in a Federated Database. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **62** (5), pp. 328-346.

- EHLERS, M. & KLONUS, S., 2008: Quality Assessment for Multi-Sensor Multi-Date Image Fusion. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **XXXVII** (Part B4), pp. 499-506.
- GÄHLER, M., 2008: Support Disaster Managemnet with Remote Sensing. GI-Reports@IGF, **8**, pp. 24 – 28.
- HINZ, S. & WIEDEMANN, C., 2004: Increasing Efficiency of Road Extraction by Self-Diagnosis. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing **70** (12), pp. 1457-1466.
- KUEHN, S.; BENZ, U., & HURLEY, J., 2002: Efficient food monitoring based on RADARSAT-1 images data and information fusion with object-oriented technology. Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, **5**, pp. 2862-2864.
- KUNDZEWICZ, Z. W., 2003: Extreme precipitation and floods in the changing world. Water Resources Systems – Hydrological Risk, Management and Development, **281**, pp. 32–39.
- KUNDZEWICZ, Z. W., 2005: Summer Floods in Central Europe. Natural Hazards, **36** (1), pp.165-189.
- MILFRED, C.J.; PARKER, D.E. & LEE, G.B., 1969: Remote sensing for resource management and flood plain delineation. 24th Midwestern States Flood Control and Water Resources Conference, May 21-22, Milwaukee.
- MORAIN, S.A. & KRAFT, W.H., 2003: Transportation Lifelines and Hazards. Proceedings of Remote Sensing for Transportation, **29**, pp. 39-46.
- NIKOLAKOPOULOS, K.G., 2004: Comparison of four different fusion techniques for IKONOS data. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 2534-2537.
- YONGHUA, S.; XIAOJUAN, L.; HUILL, G.; WENJI, Z. & ZHAOING, G., 2007: A study on optical and SAR data fusion for extracting flooded area. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 3086-3089.
- ZADEH, L.A., 1965: Fuzzy Sets. Information and Control, **8** (3), pp. 338 – 353.



# Structural Analysis of Thermokarst Lake Change in Siberia with Corona and Quickbird Satellite Data

SÖREN HESE<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: In dieser Arbeit wird ein Konzept zur Erfassung der Veränderungen der Thermokarstseen-Objektstrukturen mittels sehr hochauflösender Fernerkundungsdaten vorgestellt. In zwei unterschiedlichen Untersuchungsgebieten (West Sibirien und Lena Delta) werden multitemporale Daten des Quickbird Systems von 2004 und des Corona KH-4 Systems von 1964 analysiert. Für eine Übertragbarkeit des Verfahrens auf andere Gebiete wird ein geometrisches Anpassungsverfahren auf Basis von Centroidpunkten entwickelt und eine radiometrische Normalisierung der Datensätze durchgeführt. Auf der Basis von Bildobjekten werden strukturelle Merkmale untersucht und Veränderungen der Seeengeometrie und -struktur abgeleitet.*

*Der entwickelte Ansatz stellt ein übertragbares Konzept für die Analyse größerer Flächen dar und ist ein Beitrag zur Quantifizierung von Veränderungen die potentiell auf Permafrost Degradation zurückzuführen sind.*

## 1 Introduction

Various remote sensing approaches have been used in the past for monitoring arctic regions. Work has been done mapping arctic vegetation change (STOW et al. 2004), and direct permafrost properties (PEDDLE & FRANKLIN 1993). An overview is given in STOW et al. (2004) and LAIDLER & TREITZ (2003). Historical spatial high resolution remote sensing data for Siberia has only been becoming widely available with the declassified data from the photo-reconnaissance satellite systems of the "Key Hole"- series (Corona, Hexagon, Argon and Lanyard mission). US President Clinton signed the executive order at the 24<sup>th</sup> of February 1995 (CIA 1995; McDONALD 1995). Data sets are available for ordering through the USGS Earth Resources Observation System (EROS) Data Centre in Sioux Falls (<http://edc.usgs.gov>) using the Earth Explorer interface (<http://edcns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer/>). However as with very high resolution digital orbital scanner data image processing should not be restricted to pixel-based approaches for grey level classification. This applies even more to the data from the declassified photo-reconnaissance satellite systems as these datasets were captured using panchromatic Kodak Eastman film material and spectral information content is limited and not important as the primary information source. More relevant are relative grey level changes, feature shape and context information often used in visual interpretation of panchromatic airborne remote sensing data. Robustness and transferability of data analysis concepts should also be important aspects for the classification of water object structures in Corona data. GROSSE et al. (2005) used a thresholding approach to classify water bodies at the NE Siberian Coast in Corona data and improved the results using visual interpretation to account for errors due to vegetation- and ice-cover. BURNETT et al. (2003) mapped mires in the Männikjärve Bog (Central Estonia) using high resolution airborne CIR imagery and FROHN et al. (2005) mapped thaw lakes and drained thaw lake basins on the

---

<sup>1</sup> S. Hese, Institute for Geography, Earth Observation, Friedrich-Schiller-University Jena, Grietgasse 6, 07743 Jena, Germany, Email: [soeren.hese@uni-jena.de](mailto:soeren.hese@uni-jena.de), phone: 03641 948873.

Northslope of Alaska using an object oriented concept. SMITH et al. (2005) reported in their controversially discussed publication about the disappearance of arctic lakes in West Siberia whereas results in this work indicate an increase of very small water bodies that are not easily detectable in Landsat types of data.

The panchromatic data of the Hexagon mission is combined with multispectral data from Landsat MSS for the Lena River delta change analysis. The combination with multispectral data for this test area is unavoidable due to very shallow lake areas that are not distinguishable from vegetation in Hexagon datasets (the pan Kodak films used for these missions are not sensitive for the near infrared region). Results of the Lena delta lake change study are not included in this publication due to page restrictions.

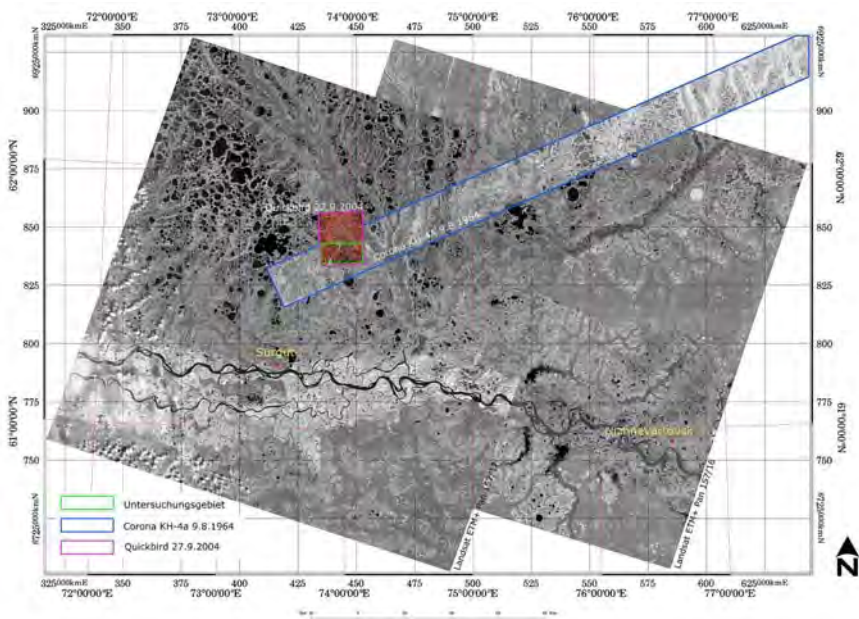


Fig. 1 A: Corona KH-4A data coverage (entity id: DS1009-2054DA104) (marked in blue) overlay with Landsat ETM+ data coverage (WRS2 156/17 and 157/17) and Quickbird data coverage (16x20 km) marked in red (West Siberia, Surgut, Ob river).

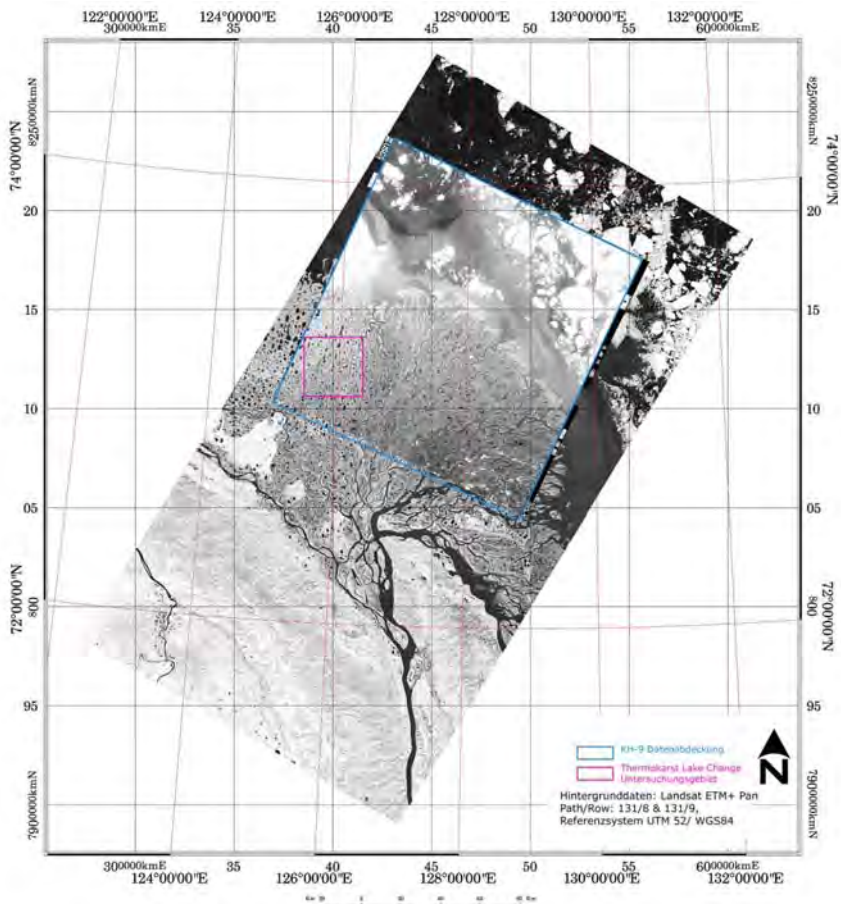


Fig. 1 B: Lena Delta test area (Siberia) (in red) with Hexagon KH-9/Landsat ETM+ Pan data coverage (Path/Row 131/8 + 9, UTM 52/WGS84).

## 2 Data and Test Area

The test area for this study is situated in the Khanty Mansi district in West Siberia north of the city Surgut. The area is known and important for its largest Russian oil and gas production. For this study Quickbird data with spatial resolution of 68 cm (pan) and 2.7 m (multispectral) from the 27<sup>th</sup> September 2004 is compared with scanned panchromatic films of the Corona KH-4A

mission with spatial resolution of approx. 2.5 m (figure 1a). The concept developed in this study is also applied to a test area in the western part of the Lena Delta (North East Siberia) (figure 1 b).

The Corona data is spatially co-registered to the Quickbird data using a lake center point correction procedure (LCPC) using centroid points from lake polygons (derived from a preliminary water classified dataset with 0.5-ha object area thresholding and very low object surround/area ratios - compactness) to precisely register lakes from 1964 to lakes from 2004. GCP coordinate couples are generated using a "spatial attribute join" based on distance. While other features might not be as precisely co-registered - using this method - the procedure has the advantage to create a multi temporal layer stack with overlapping lake polygons. This is a crucial pre-requisite for lake object area, shape, direction and structural attribute analysis. LCPC will however also mask the relative shift of lake objects towards a specific direction (possibly induced by specific prevailing wind directions). After the spatial co-registration the panchromatic grey values are normalized using water mean statistics creating floating point values and scaled to 16 Bit. The "Water Mean Normalization" (WMN) creates normalized grey values for all multi temporal or multi- sensor water objects and equalizes all kind of bit-formats originating from different sensors or preprocessing. The WMN procedure is a robust approach that creates a solid base for the design of transferable image analysis concepts (eq. 1).

$$DN_{water\_norm} = (DN/DN_{lake\_mean}) * 100 \quad \text{eq. 1.}$$

$DN_{water\_norm}$  = normalized reflectance scaled for the 16 bit data space;  
 $DN$  = original reflectance value;  
 $DN_{lake\_mean}$  = mean water grey value

### 3 Lake Change Analysis

Various lake object features are measured for this analysis (see list below). This paper will only concentrate on few important parameters.

**1. Lake object area** in m<sup>2</sup> is derived. **2. Lake object shape** is measured deriving **border index** values: a ratio from the perimeter of a fitted box and the actual object perimeter. **3. The elliptical fit** is measured based on the ratio of length to width of an ellipsis build from the same area of the polygon and comparing the area outside of the ellipsis with the area inside of the ellipsis. **4. The length to width** ratio is derived using a „bounding box“ concept and the ratio of the Eigen values of the covariance matrix. **5. Object direction**: is the main direction of an object and is generated using the larger of the two Eigen vectors from the covariance matrix (0-180 degrees). **6. Roundness** is a measure of the fit of a bounding ellipsis. Two structural lake features are analyzed. **1.** The number of neighboring lakes in counted with varying search radius distances of 30 m, 60 m, 90 m, 120 m, 150 m and 300 m to every lake. This feature measures the density in various distances. **2.** The standard deviation of area values of all lakes in a distance of 200 m to every lake is measured. This feature measures the homogeneity of the size of lakes. Changes in multi temporal data indicate a change in homogeneity/heterogeneity of area values in neighboring lakes.

Water objects that existed in 1964 and 2004 are extracted using a spatial GIS „Intersect“ function. Overlapping water objects are merged into one dataset and the attributes derived from shape and structural analysis are fused into one attribute table (spatial attribute join). Lake objects that disappeared since 1964 are extracted using an inverted intersect query of overlapping lake objects in 1964. The inversion identifies lakes that are not available in the 2004 dataset. Lake objects that appeared as new water bodies in 2004 are delineated using an intersect query of lake objects in 2004 with lake objects in 1964. The resulting 2004 object selection is inverted and creates the group of new lake objects in 2004.

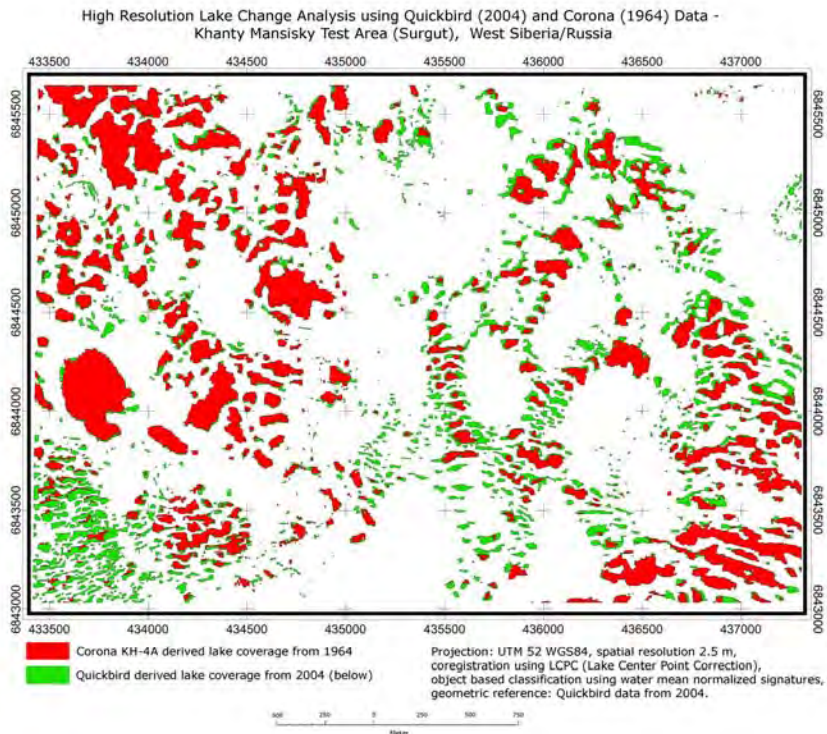


Fig. 2: Multi temporal map of lake objects from Corona data (1964) and Quickbird data (2004) using normalized panchromatic data and lake center point co-registration.

## 4 Results

Results show a modest change in directionality comparing the directional statistics of all lakes from 2004 (including new lakes). The distribution is less concentrated in the 90-100° class (as is



visible in 1964) but is spread over the classes  $80^{\circ}$ - $90^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ - $100^{\circ}$  and  $100^{\circ}$ - $110^{\circ}$  (figure 3). Area distribution clearly shows an increase of lake size in 2004 especially for very small lakes up to  $500 \text{ m}^2$  (figure 4). Lake structure homogeneity and heterogeneity is evaluated calculating the standard deviation of the area property of every lake object in a search radius of 200 m to every lake. The resulting scatter plot (figure 4) indicates 3-4 different clusters of varying area homogeneities. These clusters can also be identified visually in the map of the test area (figure 2). Some of the clusters also indicate a change of lake object structure towards higher variability of lake sizes in 2004. Overall the area covered by lakes increased from  $480599 \text{ m}^2$  (1964) to  $720342 \text{ m}^2$  (2004). This change however cannot be declared as representative for the region.

Object based measures of various spatial lake properties are a powerful and effective tool to parameterize lake change using normalized and precisely co-registered multi temporal Earth observation data. In this study the number of identified lakes between 1964 and 2004 increased and direction and density statistics changed. There remains however the challenge to link spatial properties and changes to an understanding of ecosystem functioning, ecosystem functioning change and underlying causes for changes and potential permafrost degradation. Results from the Lena Delta test site also indicate that radiometric normalization of panchromatic data is not sufficient for precise lake change monitoring. The spectral resolution of the declassified KH-missions is restricting the analysis to very broad class descriptions and cannot distinguish between shallow water bodies and various vegetation classes. For KH-data analysis since 1973 the fusion with multispectral (NIR) data of lower spatial resolution (e.g. Landsat MSS) shows promising results.

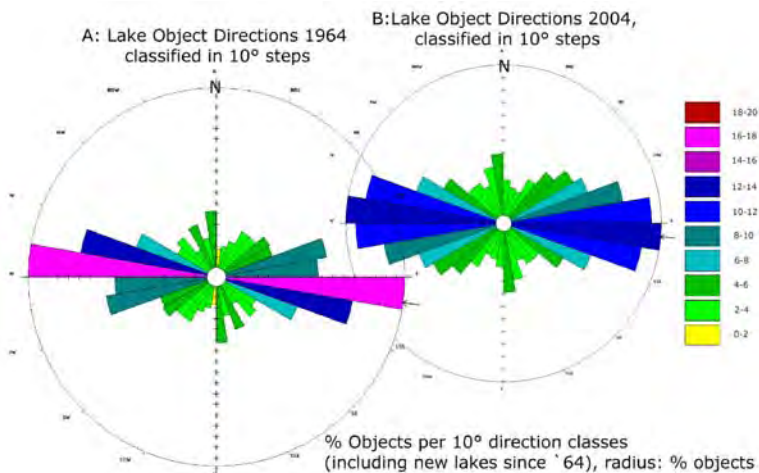


Fig. 3: Rose diagram for lake main directions (classified in 10 degrees classes). The radius represents percent lake objects (color coded). A (left): lake object directions in 1964, B (right): lake object directions in 2004.

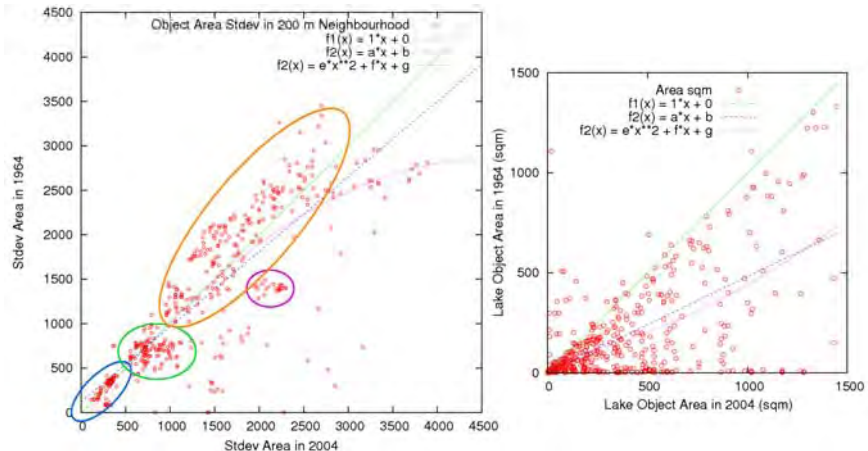


Fig. 4: Standard deviation values for lake area statistics in 200 m distance (search radius) to every lake object (2004 vers. 1964) with indicated clusters (left) and lake object area change between 1964 and 2004 in m<sup>2</sup> (right).

## 5 References

- BURNETT, C.; AAVIKSOO, K.; LANG, S.; LANGANKE, T. & BLASCHKE, T., 2003: An Object-based Methodology for Mapping Mires Using High Resolution imagery, Ecohydrological Processes in Northern Wetlands, Tallin, 30 June – 4 July 2003.
- CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY, (1995), Press release, February 24, 1995: Langley, Virginia, Central Intelligence Agency Headquarters.
- FROHN, R.C.; HINKEL, K.M. & EISNER, W.R., 2005: Satellite Remote Sensing Classification of thaw lakes and drained thaw lake basins on the North Slope of Alaska, Remote Sensing of Environment 97 (2005) 116-126.
- GROSSE, G.; SCHIRRMESTER, L.; KUNITSKY, V.V. & HUBBERTEN, H.-W., 2005: The Use of CORONA Images in Remote Sensing of Periglacial Geomorphology: An illustration from the NE Siberian Coast, Permafrost and Periglac. Process. 16: 163-172 (2005).
- LAIDLER, G.J. & TREITZ, P., 2003: Biophysical Remote Sensing of Arctic Environments, Progress in Physical Geography, Vol. 27, No. 1, 44-68 (2003)
- MCDONALD, R.A., 1995: CORONA-success for space reconnaissance, a look into the Cold War, and a revolution for intelligence: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 61, no. 6, p. 689-720.
- PEDDLE, D.R. & FRANKLIN S.E., 1993: Classification of permafrost active layer from remote sensed and topographic evidence. Remote Sensing of Environment 44: 67-80
- SMITH, L.C.; SHENG, Y.; MACDONALD, G.M. & HINZMAN, L.D., 2005: Disappearing Arctic Lakes, Science, Vol. 308, 3. June 2005.

STOW, D.A.; HOPE, A.; MCGUIRE, D.; VERBYLA, D.; GAMON, J.; HUEMMERICH, F.; HOUSTON, S.; RACINE, C.; STURM, M.; TAPE, K.; HINZMAN, L.; YOSHIKAWA, K.; TWEEDIE, C.; NOYLE, B.; SILAPASWAN, C.; DOUGLAS, D.; GRIFFITH, B.; JIA, G.; EPSTEIN, H.; WALKER, D.; DAESCHNER, S.; PETERSEN, A.; ZHOU, L. & MYNENI, R., 2004: Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic tundra ecosystems. *Remote Sensing of Environment* 89: 281–308.

## DeCOVER – Konzept für nationale Geoinformationsdienste

ANDREAS MÜTERTHIES<sup>1</sup>, OLAF BÜSCHER<sup>2</sup> & OLIVER BUCK<sup>3</sup>

*Zusammenfassung: Die bisherigen DeCOVER Entwicklungen (2006-2008) haben gezeigt, dass Satellitenfernerkundung gerade im Hinblick auf neue Sensoren wie RapidEye und TerraSAR-X einen entscheidenden Beitrag zur Aktualisierung und Erweiterung existierender Landnutzungs- bzw. Landbedeckungsdatensätze leisten kann. Im Fokus der Arbeiten der ersten DeCOVER Entwicklungen standen vor allem die Erarbeitung neuer methodischer und technologischer Ansätze der Satellitenfernerkundung zur a) Erfassung von Objekten auf Basis harmonisierter Objektartdefinitionen, b) fokussierten Fortführung dieser Information durch die Erkennung realer Landbedeckungsänderungen und c) Unterstützung amtlicher Systeme.*

*Diese DeCOVER Entwicklungen und Ergebnisse werden über eine aufbauende Projektphase weitergeführt. Neben der besonderen Berücksichtigung und Integration von Daten der neuen, operationellen deutschen Fernerkundungssensoren RapidEye und TerraSAR-X, richtet sich der Fokus dabei noch stärker auf die Nutzung und Unterstützung der Zielsysteme Digitales Landschaftsmodell (DLM), Biotop- und Nutzungstypen-Kartierung (BNTK), CORINE Land Cover (CLC) und nutzerspezifische Fachdatensätze mit dem Schwerpunkt Agrar (z.B. Cross Compliance Landschaftselemente-Kulissen) und Naturnah (FFH Lebensraumtypen).*

*Dieser Kurzbeitrag stellt die generelle Ausrichtung der vorbehaltlich im 2. Quartal 2009 beginnenden Entwicklungsarbeiten vor. Ergebnisveröffentlichungen werden u.a. in kommenden PFG-Ausgaben angestrebt.*

### 1 Projekthintergrund

Derzeit verfügbare räumliche regionale, nationale und internationale Landbedeckungs- und -nutzungsdaten sind überwiegend hinsichtlich ihrer geometrischen, syntaktischen und semantischen Kompatibilität nicht ausreichend beschrieben. Dies gilt sowohl für Daten, die in Deutschland erhoben und fortgeführt werden (ATKIS/DLM, BNTK, etc.), als auch für Fachdaten aus dem Europäischen Umfeld über CORINE Land Cover und Global Monitoring for Environment and Security (GMES Fast Track Services z.B: Sealing/Forest, UrbanAtlas), die zunehmend in nationale und regionale Prozesse integriert werden. So gewinnen Methoden zur integrierten Datenerfassung, -fortführung und -haltung eine zunehmende Bedeutung. Die Anforderungen zur nationalen Umsetzung der INSPIRE-Direktive führen ebenfalls in diese Richtung. Bisher wurde die Komponente „Satellitenfernerkundung“ für eine nachhaltige Fortführungsstrategie noch nicht umfassend berücksichtigt.

---

<sup>1</sup> Andreas Müterthies, EFTAS Fernerkundung und Technologietransfer GmbH, Oststrasse 2-18, 48145 Münster; E-Mail: [andreas.müterthies@eftas.com](mailto:andreas.müterthies@eftas.com)

<sup>2</sup> Olaf Büscher, EFTAS Fernerkundung und Technologietransfer GmbH, Oststrasse 2-18, 48145 Münster; E-Mail: [olaf.buescher@eftas.com](mailto:olaf.buescher@eftas.com)

<sup>3</sup> Oliver Buck, EFTAS Fernerkundung und Technologietransfer GmbH, Oststrasse 2-18, 48145 Münster; E-Mail: [oliver.buck@eftas.com](mailto:oliver.buck@eftas.com)

Vor diesem Hintergrund werden voraussichtlich mit dem Beginn im 2. Quartal 2009 die bisher geleisteten DeCOVER Arbeiten fortgeführt und weitere Schwerpunkte gesetzt einerseits im Bereich Interoperabilität (im Sinne der Nutzung verschiedener Datengrundlagen bzw. der Aufbereitung von Daten für verschiedene Datensätze) sowie andererseits in den Bereichen (Weiter-) Entwicklungen der DeCOVER Dienste (Ausgangsdienstbeschreibung s. BÜSCHER & BUCK., 2007) bzw. der geplanten Ergänzungsdienste in den Bereichen Offenland Agrar (Schwerpunkte Fruchtfolgenmonitoring und Berücksichtigung Cross Compliance Anforderungen) sowie Offenland Naturnah (Unterstützung FFH Monitoring) (

Abb. 1)

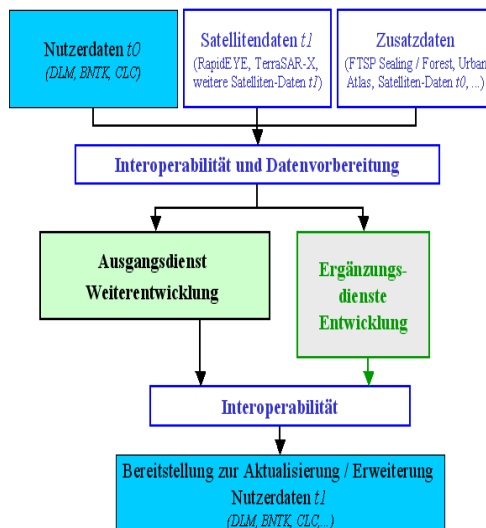


Abb. 1: Schwerpunkte in DeCOVER Phase 2

## 2 Schwerpunkt Interoperabilität und Datenvorbereitung

Der Bereich Interoperabilität und Datenvorbereitung innerhalb des DeCOVER-Verbundprojektes sieht die praxisrelevante Umsetzung zentraler Fragestellungen der Herstellung der Interoperabilität zwischen den DeCOVER-Diensten und den Zieldatensätzen der Nutzer wie

Digitales Landschaftsmodell, Biotop- und Nutzungstypen-Kartierung, CORINE Land Cover oder auch weiteren europäischen Datensätzen vor (

Abb. 2).

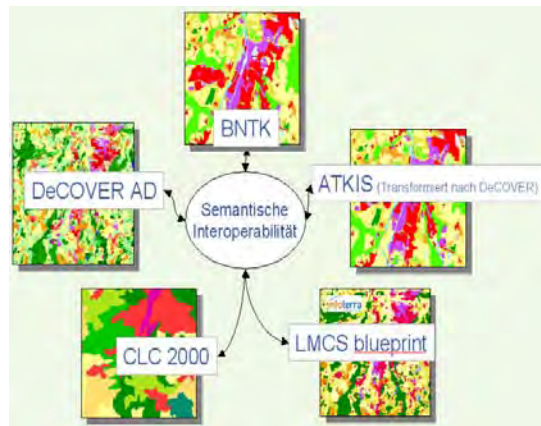


Abb. 2: Zieldatensätze der semantischen Interoperabilität

Die zu erwartenden Ergebnisse stehen somit in direkter Verbindung zur Nutzbarkeit der gegenwärtigen und zukünftigen Fernerkundungs-Sensoren. Die Einbettung des Vorhabens in den GMES-Rahmen unterstreicht hierbei den Aspekt der Interoperabilität.

Im Projektrahmen wird die Unterstützung der Initiativen und Vorhaben GDI-DE und INSPIRE zur Vereinheitlichung, Standardisierung und gemeinsamen Nutzung fernerkundungsbasierter Daten fortgeführt. Die initiierte Kommunikation mit BKG/ GDI DE und den INSPIRE-drafting Teams bieten beste Ansatzpunkte für eine Integration der Belange der Satellitenfernerkundung in diese Prozesse.

### 3 Schwerpunkt Weiterentwicklung und Umsetzung des Ausgangsdienstes

Weiterhin bilden Innovationsansätze zur technischen und thematischen Sensorintegration sowie zur sensorunabhängigen Veränderungsanalyse (Change detection) Kernaspekte des Projektes. Hinsichtlich der erarbeiteten Methoden zum DeCOVER Ausgangsdienst werden Weiterentwicklungen fokussiert, die zum Einen die Adaption auf die neuen Sensoren RapidEye

und TerraSAR-X beinhalten, zum Anderen Erkenntnisse der Interoperabilität und Change Detection (Abb. 3) zu einer effizienten Datenerstellung zusammenführen. Im Rahmen von Testumsetzungen werden in einem ersten Schritt Daten der Zielsysteme großflächig mittels der gewonnenen Erkenntnisse zur semantischen Dateninteroperabilität in den DeCOVER Objektartenkatalog überführt, um in einem zweiten Schritt die transformierten Daten mittels des erarbeiteten Change Detection-Ansatzes (BÜSCHER et al., 2008) zu aktualisieren.



Abb. 3: Zusammenführung verschiedener Indikatoren zur objektbasierten Veränderungserkennung und Analyse potenziell veränderter DeCOVER- Objekte

## 4 Schwerpunkt Entwicklung Ergänzungsdienste

Die bisherigen DeCOVER Ergebnisse zeigen, dass zur Erfüllung bestehender Nutzeranforderungen in praktisch allen thematischen Teilbereichen weitere, über den DeCOVER Ausgangsdienst hinausgehende Geofachdaten mit einer größeren Klassentiefe notwendig sind. Während die Bereiche Urban und Wald Schwerpunkt-Themen innerhalb laufender GMES-Entwicklungen bilden, werden sich die Arbeiten im Rahmen des DeCOVER Projektes auf die Teilbereiche Agrar und Offenland Naturnah konzentrieren. Hierzu werden die Ausgangsdienst Methoden durch Entwicklungen in diesen Fachbereichen erweitert. Im Bereich Agrar sind als zentrale Themen das Monitoring der Hauptkulturlandnutzung und Cross Compliance Veränderungssperren zu nennen. Im Bereich Naturnah beziehen sich die Arbeiten insbesondere auf das FFH-Monitoring.

Seit dem Inkrafttreten der EU-Richtlinie zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie wildlebenden Tiere und Pflanzen (FFH-Richtlinie) sind alle Mitgliedsstaaten dazu verpflichtet, über die Durchführung der in den Richtlinien vorgesehenen Maßnahmen zu berichten.

Fernerkundungsdaten bieten aufgrund ihrer Flächenabdeckung und zeitlichen Auflösung die ideale Grundlage für großräumige einheitliche Kartierungen.

Gerade für die Beurteilung des Ist-Zustandes, sowie von Veränderungen (geometrisch und qualitativ) können (teil-)automatisierte, fernerkundliche Methoden zur Datenerfassung und Datenverarbeitung wesentlich zur Verringerung des Arbeits- und Zeitaufwandes, sowie für Visualisierungszwecke dienen (BEULE et al., 2004).

Neben den multispektralen Merkmalen der Oberflächen werden für die Klassifikation X-Band Rückstreuwerte, zeitliche Signaturverläufe, Texturparameter und Segmenteigenschaften verwendet werden, um möglichst automatisiert eine flächendeckende Change Detection vorzunehmen. Im Gegensatz zu anderen Studien (SEILER et al., 2004; FRICK 2006) sollen hierbei explizit auch multi-temporale Informationen aus X-Band Daten zusammen mit multispektralen Objekteigenschaften und Texturinformationen verwendet werden. Es hat sich gezeigt, dass insbesondere multi-temporale Signaturen bei der Klassentrennung hilfreich sind (WASKE & SCHIEFER, 2006).

## 5 Ausblick

Auch in der zweiten DeCOVER Projektphase wird das Projektkonsortium das bewährte Vorgehen von zwei Zyklen aus Spezifikation, Methodenentwicklung und Testumsetzung wählen, gekoppelt an eine intensive Nutzereinbindung zur Begleitung und Validierung der Entwicklungszyklen.

Im Bereich des DeCOVER-Ausgangsdienstes wird stark auf die Ergebnisse der ersten DECOVER Entwicklungsphase aufgesetzt, so dass die nötigen Methodenentwicklungen überschaubar sind und entsprechend zeitnah mit dem Beginn einer großflächigen Umsetzung zu rechnen ist.

Begleitet werden die Projektarbeiten durch ein systematisches und transparentes Qualitätsmanagement.

Ausführliche Beiträge zu den Projektergebnissen sollten in kommenden PFG Heften wieder zu finden sein.

## 6 Literaturverzeichnis

BEULE et al., 2004: Anforderungsanalyse der Nutzung von satellitenbasierten

Erdbeobachtungssystemen für die Umweltpolitik (SATUM), Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Forschungsbericht 202 91 601, UBA-FB 000693.

BÜSCHER, O. & BUCK, O., 2007: DeCover - Geoinformation Services to Update and Supplement Land Cover Data for German Decision Makers, ISPRS Hannover Workshop: High Resolution Earth Imaging for Geospatial Information, IntArchPhRS XXXVI. Band 1/W51. Hannover, CD.



- BÜSCHER, O.; BUCK, O.; LOHMANN, P.; HOFMANN, P.; MÜLLER, S.; SCHENKEL, R. & WEISE, C., 2008: Einsatz von Change Detection Methoden zur Fortführung von DeCOVER Objektarten. In: PFG – Jahrgang 2008, Heft 5, S. 395-407.
- FRICK, A., 2006: Beiträge höchstauflösender Satellitenfernerkundung zum FFH-Monitoring – Entwicklung eines wissensbasierten Klassifikationsverfahrens und Anwendung in Brandenburg. Dissertation. TU Berlin. Urn:nbn:de:kobv:83-opus-14139.
- SEILER, U.; NEUBERT, M. & MEINEL, G., 2004: Automatisierte Erfassung von Biotop- und Nutzungstypen durch segmentbasierte Klassifikation von IKONOS-Satellitenbilddaten. In: Naturschutz und Landentwicklung 36 (4), S. 101-106.
- WASKE, B. & SCHIEFER, S., 2006: Classifying segmented multitemporal SAR data from agricultural areas using support vector machines. Braun, M. In: Proc. 2nd Workshop of the EARSeL SIG on Land Use and Land Cover. Bonn, Germany.

# Modellierung von Unsicherheiten in klassifizierten, räumlich hoch aufgelösten Fernerkundungsszenen

JOCHEN SCHIEWE<sup>1</sup>, MANFRED EHLERS<sup>2</sup>, CHRISTOPH KINKELDEY<sup>1</sup> & DANIEL TOMOWSKI<sup>2</sup>

*Zusammenfassung:* Wir stellen einen integrierten Ansatz zur Bewertung von Unsicherheiten in klassifizierten Fernerkundungsszenen vor, der nicht nur die Unsicherheiten in den klassifizierten Daten, sondern auch in den Referenzdaten berücksichtigt. Hierbei werden die Unsicherheiten in den unscharfen Übergangsbereichen zwischen Objektklassen auf Basis der fuzzy logic-Theorie modelliert. Schwerpunktmäßig beschreibt der Beitrag die geometrisch-semantic begründete Konstruktion dieser Übergangsbereiche.

## 1 Einleitung

Mit der ständig wachsenden Bedeutung von Informationen, die aus Fernerkundungsdaten für Planungs- und Entscheidungsprozesse abgeleitet werden, steigt auch die Notwendigkeit, verbindliche und fundierte Aussagen zu deren geometrischen und thematischen Unsicherheiten zu erzeugen. Bei der a posteriori Bewertung von Klassifizierungsergebnissen – insbesondere solchen, die auf räumlich hoch auflösenden Daten basieren – treten im Gegensatz zu klassischen Verfahren Probleme auf, die eine Reihe von Weiterentwicklungen notwendig machen. Diese werden in dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten und von den Autoren derzeit durchgeführten Projekt „Classification Assessment using an Integrated Method (CLAIM)“ aufgegriffen.

Ein zentraler Problembereich bei der Bewertung von Unsicherheiten besteht in den Imperfektionen von Referenzdaten („ground truth“), die aufgrund der höheren geometrischen und thematischen Anforderungen immer stärker ins Gewicht fallen bzw. nicht mehr vernachlässigt werden dürfen. Daher propagieren wir einen integrierten Ansatz, der nicht nur die Unsicherheiten in den klassifizierten Daten, sondern auch in den Referenzdaten berücksichtigt. Mit verbesserten räumlichen Auflösungen verschärft sich auch das Phänomen der unbestimmbaren Grenzen, dem beispielsweise mit einem verstärkten Einsatz der fuzzy logic-Theorie begegnet werden kann. Bisher gibt es allerdings keine umfassenden Lösungen zur Bewertung der Unsicherheiten in den entstehenden unscharfen Übergangsbereichen. Aufbauend auf tiefer gehenden Beschreibungen der Problemstellung und des allgemeinen Lösungsansatzes (Abschnitt 2), die u.a. auf den Arbeiten von SCHIEWE & EHLERS (2007) bzw. SCHIEWE & GÄHLER (2008) beruhen, liegt der Schwerpunkt dieses Beitrages auf der geometrisch-semantic begründeten Konstruktion von unscharfen Übergangsbereichen (Abschnitt 3). Ein Ausblick (Abschnitt 4) rundet diesen Zwischenbericht zum Projekt CLAIM ab.

---

1) J. Schiewe & C. Kinkeldey: HafenCity Universität Hamburg, Lab for Geoinformatics and Geovisualization, Hebebrandstr. 1, 22297 Hamburg, E-Mail: {jochen.schiewe, christoph.kinkeldey}@hcu-hamburg.de  
2) M. Ehlers & D. Tomowski: Universität Osnabrück, Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, Seminarstr. 19a/b, 49364 Osnabrück, E-Mail: {mehlers, dtomowski}@igf.uni-osnabrueck.de

## 2 Problemstellung und Lösungsansatz

### 2.1 Allgemeine Problemstellung

Es ist offenkundig, dass bei der Extraktion von thematischen Informationen aus Fernerkundungsdaten eine Reihe von Unsicherheitseinflüssen zu berücksichtigen ist. So beschreiben GAHEGAN & EHLERS (2000) die Unsicherheitskette, die parallel zum Modellierungsprozess (von der Szenenerfassung über die Klassifizierung bis hin zur Objektbildung) verläuft. Da die einzelnen Fehlerquellen oft nicht mehr oder nicht exakt quantifizierbar sind, werden in der Regel genäherete, summarische Verfahren zur Beschreibung der Klassifizierungsgüte angewendet. Für diese Zwecke werden bislang standardisierte empirische Verfahren verwendet, die die Übereinstimmung von Referenzdaten mit den klassifizierten Daten betrachten und daraus Fehlermatrizen oder einzelne Kennwerte (wie Gesamt-, Hersteller- und Nutzergenauigkeit oder Kappa-Koeffizient) ableiten (vgl. z.B. CONGALTON, 1991).

Bei der thematischen Auswertung hoch auflösender Fernerkundungsdaten ergeben sich in diesem Zusammenhang einige neue Probleme, denen inzwischen durch automatisierte, regionen-basierte bzw. objekt-spezifische Verfahren sowie alternative (z.B. fuzzy logic) Klassifikatoren Rechnung getragen worden ist. Dagegen muss festgestellt werden, dass eine hinreichende Anpassung von Verfahren zur **a posteriori Bewertung von Klassifikationsergebnissen** noch nicht stattgefunden hat. Im Einzelnen ist zu konstatieren:

- Bei klassischen Bewertungsverfahren (d.h., einem Vergleich zwischen Klassifikationsergebnis und Referenz) wird davon ausgegangen, dass Fehler ausschließlich in den klassifizierten Daten vorliegen. Während diese Annahme bei niedrig aufgelösten Fernerkundungsdaten aufgrund der potenziellen Verfügbarkeit wesentlich genauerer Referenzdaten noch tolerierbar ist, sind bei Auswertungen, die auf hoch auflösenden Daten basieren, Fehler in den Referenzdaten aufgrund einer schlechteren „relativen Auflösung“ nicht mehr vernachlässigbar. Stattdessen ist ein **integriertes Bewertungsverfahren** notwendig, das die Qualität der Referenzdaten berücksichtigt.
- Mit der höheren räumlichen Auflösung werden unscharfe Übergangsbereiche zwischen bestimmten Objektklassen bezüglich der absoluten Anzahl von Pixel noch vergrößert. Zwar werden deshalb zur thematischen Auswertung schon oft angepasste (fuzzy logic) Klassifikatoren eingesetzt, entsprechende **fuzzy logic Bewertungsverfahren** finden dagegen aber kaum Anwendung.
- Ebenso basieren trotz der regionen-basierten bzw. objekt-spezifischen Interpretation der Fernerkundungsszenen die meisten Bewertungsverfahren noch auf stichprobenartigen, punkt- bzw. pixelbasierten Vergleichen zwischen Referenzdaten und Klassifikationsergebnissen. Auch hier ist der Übergang zu **objekt-spezifischen Bewertungsverfahren** unabdingbar.

### 2.2 Unscharfe Übergangsbereiche

In diesem Beitrag liegt der Fokus auf der Modellierung unscharfer Übergangsbereiche sowie der Beschreibung ihrer Unsicherheiten. Es gibt eine Reihe von Gründen, sich neben wahrschein-

keitsbasierten Ansätzen gerade bei Verwendung räumlich hoch auflösender Fernerkundungsdaten mit entsprechenden Ansätzen zu beschäftigen:

- 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 in semantisch schlecht definierbaren Grenzen haben.
- 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“ oder die Eingruppierung in „starke Verschmutzung“ vs. „geringe Verschmutzung“). 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.).
- Schließlich ist festzuhalten, dass die beobachteten Daten oft für eine eindeutige Zuweisung zu den definierten Kategorien nicht geeignet sind (ZHANG & GOODCHILD, 2002).

Neben der Verwendung von ( $\varepsilon$ -)Bändern (z.B. CHRISMAN, 1992) bietet sich zur Modellierung von Unschärfen im Rahmen der Klassifizierung sowie der anschließenden Ergebnisevaluation 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. EDWARDS & LOWELL (1996) definieren eine Zugehörigkeitsfunktion zur Beschreibung räumlicher Unsicherheiten. Hierzu werden für alle Paare von Objektklassen („twins“) 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).

### 3 Konstruktion von Übergangszonen

Basierend auf der geschilderten Problemstellung besteht die generelle Aufgabenstellung in der Definition eines erweiterten Güte- bzw. Sicherheitsmaßes, das Unsicherheiten bzw. Unschärfen in der Referenz und dem Klassifizierungsergebnis berücksichtigen kann. Hierzu müssen in einem ersten Schritt sowohl im Klassifizierungsergebnis als auch in der Referenz Übergangszonen erzeugt werden, die entlang jeder gegebenen Grenze zwischen klassifizierten Objekten verlaufen.

### 3.1 Geometrische Modellierung

Die Übergangszonen fungieren als Modell des Grenzbereichs zwischen zwei klassifizierten geographischen Objekten. Ihre Geometrie wird abhängig von der Art der angrenzenden Objekte ausgestaltet. Dabei wird grundsätzlich von symmetrischen Übergangsbereichen ausgegangen, d.h. für jeweils zwei benachbarte Objekte gilt dieselbe Geometrie für ihre Übergangszone.

Um die Geometrien für die Übergangsbereiche zu generieren, werden die Grenzen zwischen benachbarten Objekten mit einem beidseitigen Puffer versehen (Abb. 1, links). Dessen **Breite** richtet sich nach den Klassen der betrachteten Objekte und ist zuvor auf Grundlage semantischer Aspekte für jedes auftretende Paar von Objektklassen definiert worden (siehe Abschnitt 3.2). Innerhalb der Übergangszone wird nun senkrecht zur Objektgrenze eine Fuzzy-**Zugehörigkeitsfunktion** angesetzt, deren Werte im Intervall  $[0.0, 1.0]$  definiert sind (Abb. 1, rechts). Das Resultat ist ein Funktionsverlauf, der den Wert 1.0 (volle Zugehörigkeit zur betrachteten Klasse) am inneren Rand der Übergangszone und den Wert 0.0 (keine Zugehörigkeit) am äußeren Rand aufweist.

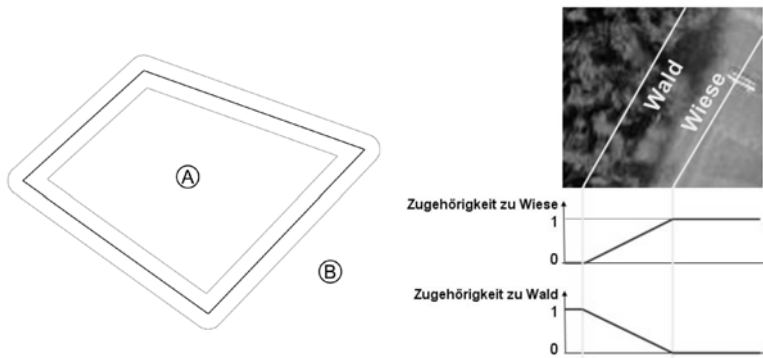
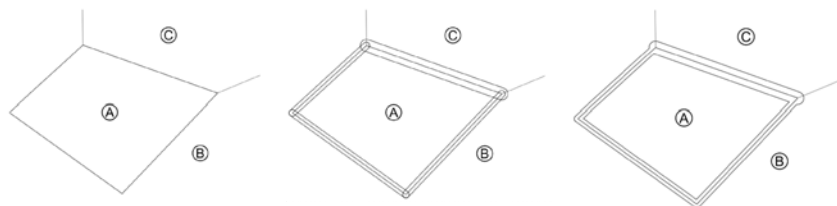


Abb. 1: Pufferbildung um Objektgrenzen (links) und Definition der Zugehörigkeitsfunktionen (rechts)

Derzeit ist die Betrachtung auf lineare Fuzzy-Funktionen beschränkt, im Verlauf der Untersuchungen sollen ebenfalls nicht-lineare Zugehörigkeitsfunktionen auf ihre Zweckmäßigkeit hin untersucht werden. Denkbar ist beispielsweise die Anwendung verschiedener Arten von Fuzzy-Funktionen zur Berücksichtigung der Gestalt unterschiedlicher Übergänge zwischen bestimmten Objekten.

Neben der einfachsten Konstellation, bei der ein Objekt nur ein einziges benachbartes Objekt besitzt, muss ebenso dem Fall von **mehreren benachbarten Objekten** Rechnung getragen wer-

den. Dessen Behandlung wird in Abb. 2 skizziert. Dieses Vorgehen garantiert einen konsistenten Funktionsverlauf für die gesamte Übergangszone des Objekts, ohne dass Sonderfälle wie die Überlappung mehrerer Zonen gesondert behandelt werden müssen. Auf diese Weise ist die eindeutige Bestimmung des Klassenzugehörigkeits-Werts für die Klasse des jeweiligen Objekts sichergestellt.



1. Aufteilung der Objektgrenze in Teilgrenzen      2. Bildung einer Übergangszone je Teilgrenze      3. Vereinigung der Teilzonen eines Objekts zu einer gesamten Zone

Abb. 2: Zonenbildung für mehrere Nachbarn

=

### 3.2 Aspekte zur semantischen Modellierung

Zur operationellen Umsetzung unseres Verfahrens für allgemeingültige Objektartenkataloge oder Landbedeckungsklassen gehen wir von der Annahme aus, dass anthropogen geprägte Strukturen, wie z.B. Siedlungen und Verkehrsinfrastruktur durch Ihre künstliche Bauweise (geradlinige oder kompakte Objekte) schmalere Übergangszonen besitzen als naturnahe Strukturen, die oft unscharfe und breitere Grenzverläufe zueinander besitzen (Beispiel: Verhältnis von Ozean und Strand oder von Wäldern zu Ackerflächen). Durch die vom Menschen verursachte Geometrisierung der Landschaft durch Siedlungstätigkeiten oder Flurbegradigungen in der Landwirtschaft nimmt die Komplexität der Form und die Unschärfe der Elemente zueinander ab, wodurch auch die Breite von Übergangszonen geringer wird.

Eine allgemeingültige Angabe absoluter Breiten von Übergangszonen für alle Arten und Auflösungen von Satellitenbilddaten ist unserer Meinung nach auf Grund multipler unterschiedlicher Einflussfaktoren schwierig bzw. unmöglich. Ein alternativer Ansatz zur qualitativen Differenzierung der Breite ist unserer Meinung nach das aus der Ökologie stammende Hemerobiesystem nach JALAS (1955), das von SUKOPP (1972) weiterentwickelt worden ist. Dabei werden Lebensräume und Vegetationstypen nach „Naturnähe“ und „Naturferne“ differenziert. Flächen werden über eine Skala von ahemerob (natürlich) bis polyhemerob (naturfern) klassifiziert. So kann der **Hemerobiegrad** (oder auch Natürlichkeitsgrad) als ein Maß für den Grad für die menschlichen Überprägung von Landschaften angesehen werden, der auch prinzipiell auf Fernerkundungsdaten anwendbar ist, sofern alle Parameter zu Berechnung des Hemerobiegrades vorliegen.

Erste Ansätze, den relativ komplexen Indikator „Hemerobie“ mit Satellitenbilddaten zu verknüpfen, wurden z.B. im SINUS-Projekt in Österreich (vgl. WRBKA et al. 2003) entwickelt. Hierbei wurde ein statistischer Zusammenhang zwischen Strukturindizes (wie z. B. Anzahl der Landschaftselemente, Shannon-Diversitäts-Index, Shannon-Eveness-Index), die aus Satellitenbilddaten errechnet wurden und dem Grad der menschlichen Überprägung festgestellt. Als Ergebnis wurden u.a. für die jeweils untersuchten Kulturlandschaften Landbedeckungsklassifikationen und der Hemerobiegrad für vorher definierte Flächen bzw. Landschaftstypen gegenübergestellt.

Basierend auf diesen veröffentlichten Forschungsergebnissen und eigenen Testreihen wurde für die ersten Versuche zur Definition von Breiten von Übergangszonen eine ordinale Rangfolge aufgestellt, die angibt, welche Klasse welche Übergangszonenbreite besitzt und wie sich die Klassen zueinander verhalten. Weiterhin wird für die Beschreibungen der Übergangszonenbreiten eine qualitative Skala von „0“ für eine sehr geringe Breite bis „++++“ für eine sehr große Breite von Übergangszonen verwendet (Tab. 1). Schließlich gehen wir von der Annahme aus, dass bei einem direkten Vergleich von benachbarten Flächen unterschiedlicher Klassen immer die naturferne und in der Grenzgestalt geometrisch schärfere Klasse die Breite der gesamten Übergangszone definiert (Minimum-Annahme).

Rangfolge	Klasse	Einordnung	Übergangszonenbreite
1.	Biotope	sehr breit	++++
2.	Gewässer	breit	++++
2.	Kleinstrukturen (z.B. naturnahe Feldgehölze)	breit	++++
3.	Wälder und Forste	mittel bis breit	+++
4.	Grünland	mittel	++
4.	Brachen	mittel	++
5.	Ackerland	gering breit	+
5.	Obst-Weinbau	gering breit	+
5.	Siedlung und Industrie	gering breit	+
6.	Verkehrswege	sehr gering breit	0

Tab. 1: Vorgeschlagene Verhältnisse von Übergangszonenbreiten unterschiedlicher Klassen im Vergleich

Um die genannten Einflüsse auf die Breite der Übergangszonen weiter zu untersuchen, wird daher für zukünftige Testreihen angestrebt, durch die Integration von weiterem Fachwissen und die Beschränkung auf Spezialfälle mit wenigen Klassen die Breite von Übergangszonen zuerst für eine bestimmte spezifische Fragestellung und Klassen abzuleiten, um im weiteren Verlauf der Forschung aus diesen Spezialfällen allgemeine Aussagen treffen zu können.

### 3.3 Berechnung des Sicherheitsmaßes CFCM

Die – nach der Beschreibung in den Abschnitten 3.1 und 3.2 ermittelten – Klassenzugehörigkeiten in Referenz und Klassifikationsergebnis ( $\mu_{\text{REF}}$  und  $\mu_{\text{CLASS}}$ ) stellen die Grundlage für die Ableitung eines Sicherheitsmaßes dar, das eine Bewertung der Übereinstimmung von Referenz und

Klassifikation unter der Berücksichtigung von Unsicherheiten und Unschärfe in den Daten ermöglicht. Außerhalb der Übergangszonen können die Klassenzugehörigkeiten entweder den Wert 1.0 (Punkt liegt in einem Objekt der Klasse) oder 0.0 (Punkt liegt nicht in einem Objekt der Klasse) besitzen. Innerhalb der Übergangszonen werden die Klassenzugehörigkeiten durch die Fuzzy-Funktion bestimmt und können somit jeden Wert im Intervall [0.0, 1.0] annehmen. Aus den Differenzen der Klassenzugehörigkeiten  $\mu_{REF}$  und  $\mu_{CLASS}$  kann nun ein Gesamtwert CFCM (class-specific fuzzy certainty measure) pro Klasse berechnet werden:

$CFCM(c) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  \mu_{i,REF}(c) - \mu_{i,CLASS}(c) $	$\mu_{REF}(c):$ $\mu_{CLASS}(c):$	Klassenzugehörigkeitswert eines Pixels (einer Region) für Klasse c in Referenzdaten Klassenzugehörigkeitswert eines Pixels (einer Region) für Klasse c im Klassifikationsergebnis
$\forall i   \mu_{i,REF} > 0 \vee \mu_{i,CLASS} > 0$	$n:$	Anzahl Pixel (oder Regionen) in der Untersuchung

Je größer der resultierende CFCM-Wert für eine Klasse ist, desto größer wird die Koinzidenz zwischen den Objekten der Klasse im Referenz-Datensatz und in der Klassifikation eingeschätzt.

## 4 Ausblick

Das beschriebene **Konzept** der geometrisch-semantischen Modellierung erlaubt eine begründete Beschreibung der unscharfen Übergangszonen in der Referenz und im Klassifikationsergebnis. Hiermit ist die Ableitung von fuzzy logic-Klassenzugehörigkeiten möglich, die ihrerseits in ein klassenspezifisches Sicherheitsmaß eingehen, welches eine integrierte und fundierte Bewertung der Klassifikationsgüte ergibt.

Für die **programmtechnische Umsetzung** des Unsicherheits-Konzepts sind zwei vorrangige Ziele definiert worden: Sie sollen zum einen der Validierung und Weiterentwicklung des Konzepts dienen, zum anderen zu einer Bibliothek heranwachsen, auf deren Grundlage ein operationeller Einsatz des Konzepts ermöglicht werden soll. Die Evaluation der unterschiedlichen Implementierungsmöglichkeiten hat zur Auswahl der MATLAB-Umgebung geführt. Das grundlegende Modell für die Berechnung des Sicherheitsmaßes CFCM konnte in einem relativ kurzen Zeitraum umgesetzt werden. Der aktuelle Stand der Implementierung dient bereits als Grundlage für die Validierung der Übergangszonen und deren Konstruktions-Parameter. Im Verlauf der Untersuchungen ist eine sukzessive Erweiterung der Bibliothek geplant.

Zur Ausdifferenzierung der Breite der Übergangszonen wird angestrebt, durch sukzessive Testreihen und die Integration von weiterem Fachwissen die begonnene heuristische Klasseneinteilung zu verfeinern und in Zukunft für beispielhafte Testgebiete die Breite der Übergangszonen in absoluten Zahlen zu ermitteln.

## 5 Danksagung

Die Ergebnisse dieses Beitrages sind im Rahmen des Projektes „Entwicklung einer integrierten, fuzzy logic- und objekt-spezifischen Methode zur a posteriori Bewertung von Klassifikationser-



gebnissen (CLAIM)“ entstanden, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird.

## 6 Literaturverzeichnis

- CHRISMANN, N.R., 1982: A Theory of Cartographic Error and Its Measurement in Digital Databases. *AUTOCARTO*, (5): 159-168.
- CONGALTON, R., 1991: A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37: 35-46.
- 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.
- GAHEGAN, M. & EHLERS, M., 2000: A Framework for Modeling of Uncertainty in an Integrated Geographic Information System, *ISPRS Journal of Photogrammetry & RS*, 55: 176-188.
- JALAS, J., 1955: Hemerobe und hemerochrome Pflanzenarten. Ein terminologischer Reformversuch. *Acta Soc. Flora Fauna Fennica*, 72: 1-15.
- LORENZEN, B. & JENSEN, A., 1991: Spectral properties of barley canopy in relation to the spectral properties of single leaves and the soil. *Remote Sensing of Environment*, 37: 33-47.
- PENUELAS, J.; FILELLA, C.; BIEL, C.; SERRANO, L. & SAVE, R., 1993: The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status. *Int. J. Remote Sens*, 14: 1887-1905.
- SCHIEWE, J. & EHLERS, M., 2007: Fuzzy models for handling uncertainty in the integration of high resolution remotely sensed data and GIS. In: Morris, A. & Kokhan, S. (Hrsg.): *Uncertainty in Environmental Security (NATO-Workshop, Kiev)*: 89-106.
- SCHIEWE, J. & GÄHLER, M., 2008: Modeling uncertainty in high resolution remotely sensed scenes using a fuzzy logic approach. In: Blaschke, T., Lang, S. & Hay, G. (Eds.): *Object-Based Image Analysis Spatial Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*: 755-768.
- SUKOPP, H., 1972: Wandel von Flora und Vegetation in Mitteleuropa unter dem Einfluß des Menschen. *Berichte über Landwirtschaft*, 50: 112-139.
- WANG, F., 1990: Improving Remote Sensing Image Analysis through Fuzzy Information Representation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 56(8): 1163-1169.
- WRBKA, T. et al., 2003: Landschaftsökologische Strukturmerkmale als Indikatoren der Nachhaltigkeit, Endbericht des Forschungsprojektes "SINUS", Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur, Wien, Österreich (CD-ROM).
- ZHANG, J. & GOODCHILD, M., 2002: *Uncertainty in Geographical Information*. Taylor & Francis, 266 S.

# **RapidEye - Das „schnelle Auge“ für das Monitoring von Cross-Compliance-Landschaftselementen?**

## **Eine Potentialanalyse mit simulierten Satellitendaten**

**ANDREAS VÖLKER<sup>1</sup> & CORDT BÜKER<sup>2</sup>**

*Zusammenfassung: In der Europäischen Union werden landwirtschaftlichen Betrieben auf Antrag Direktzahlungen im Rahmen von Betriebsprämien gewährt. Eine Voraussetzung der Gewährung von Direktzahlungen ist u. a. die Erhaltung von Landschaftselementen im Rahmen der Einhaltung anderweitiger Verpflichtungen, das sog. Cross Compliance (CC). Aus dem Verbot zur Beseitigung von Landschaftselementen leitet sich daher die Pflicht der Agrarverwaltung zur regelmäßigen Überprüfung der betreffenden Landschaftselement-Referenzflächen ab. Die hier vorgestellte Potentialanalyse beschreibt ein Konzept sowie erste Ergebnisse für die Prüfung simulierter RapidEye-Daten (5 m pro Pixel) auf ihre Eignung zum Monitoring von CC-Landschaftselementen im Rahmen einer manuellen Testdigitalisierung sowie anhand einer automatisierten, objektbasierten Klassifikation.*

## **1 Einführung**

### **1.1 InVeKoS**

Landwirte erhalten für ihre Flächen sogenannte Direktzahlungen (VO (EG) 796/2004). Berechnet werden die flächengebundenen Ausgleichszahlungen aufgrund der vom Landwirt gemachten Angaben zur Fruchtfolge zusammen mit dem Subventionsantrag. Im Rahmen der sog. Cross-Compliance-Verpflichtungen ist es den Antragstellern seit 2005 erlaubt, bestimmte Landschaftselemente (LE, d. h. Hecken, Baumreihen, Feldgehölze, etc.) als Teil des Direktzahlungsantrages zu beantragen. Die Dokumentation besteht je nach Land aus GIS-Skizzen oder auch aus digitalen Geometrien (Polygonshapes). Die Anträge der Landwirte müssen jährlich bis zum 15. Mai bei dem jeweiligen für die Landwirtschaft zuständigen Amt eingereicht werden. Um Betrug vorzubeugen, hat die EU-Kommission ein "Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem" (InVeKoS) für bestimmte Beihilferegelungen der Gemeinschaft eingerichtet. Innerhalb des InVeKoS sind eine Reihe von Abfragen und Kontrollen, einschließlich Vor-Ort-Kontrollen, vorgesehen. Letztere sollen eine Stichprobe von mind. 5 % der Anträge abdecken und werden i. d. R. als Fernerkundungskontrollen durchgeführt.

### **1.2 Cross-Compliance-Monitoring**

Im Rahmen der Cross-Compliance(CC)-Anforderungen wird die volle Gewährung von Direktzahlungen an landwirtschaftliche Betriebe an die Einhaltung verbindlicher Vorschriften in Bezug auf die landwirtschaftlichen Flächen, die landwirtschaftliche Erzeugung und die landwirtschaftliche Tätigkeit geknüpft (VO (EG) 1782/2003). Diese Verpflichtungen betreffen u. a. Regelungen zur Erhaltung landwirtschaftlicher Flächen in einem guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand, wozu auch die Erhaltung bestimmter Landschaftselemente gehört.

1) Andreas Völker, EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH, andreas.voelker@eftas.com (Doktorand am Institut für Landschaftsökologie - Universität Münster)

2) Dr. Cordt Büker, EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH, Oststraße 2-18, 48145 Münster, cordt.bueker@eftas.com

Diese sogenannten CC-LE erfüllen ganz bestimmte Kriterien hinsichtlich Ausdehnung und Typ. Werden bei einer Kontrolle der Landschaftselemente nicht genehmigte Verkleinerungen der Fläche festgestellt oder das Landschaftselement gar nicht mehr aufgefunden, so kann die Zahlung der Direktzahlungen ausgesetzt werden. Eine teil-automatisierte Erfassung dieser Landschaftselemente würde aufgrund standardisierter Abläufe die Nachvollziehbarkeit der Kontrollen erhöhen und wäre dort ebenso von hohem wirtschaftlichem Nutzen wie natürlich bei der Erstellung der Referenzgrundlagen.

### 1.3 RapidEye

Das RapidEye-System besteht aus fünf Satelliten, die die Erde seit August 2008 auf einer sonnensynchronen Umlaufbahn umkreisen. Die Sensoren liefern multispektrale Bilder in fünf Kanälen (siehe Tab. 1). Die Sensoren sind schwenkbar, so dass Stereoaufnahmen möglich sind, und haben eine Aufnahmebreite von ca. 77 km. Die Bodenauflösung pro Kanal beträgt im Nadir 6,5 m pro Pixel, die im Rahmen der Orthorektifizierung künstlich auf eine Auflösung von 5 m pro Pixel hochgerechnet werden (RAPIDEYE AG 2008).

Tab. 1.: Wellenlängenbereiche der RapidEye-Sensoren, Quelle: RAPIDEYE AG (2008)

	<b>Blau</b>	<b>Grün</b>	<b>Rot</b>	<b>Red-Edge</b>	<b>NIR</b>
<b>Wellenlängenbereich</b>	440 - 510 nm	520 - 590 nm	630 - 685 nm	690 - 730 nm	760 - 850 nm

Eine spektrale Besonderheit für fernerkundliche Fragestellungen im Agrarbereich stellt der sog. Red-Edge-Kanal dar, der eine hohe Aussagekraft bzgl. der Vitalität von Vegetation aufweist. Besonders interessant ist der Red-Edge-Kanal für die Klassifikation von Kulturarten. In den Rot- und nahen Infrarot-Bereichen erreicht die Reflexion von Feldfrüchten bereits sehr früh im Jahr (Februar bis April) ein spektrales lokales Minimum bzw. Maximum und verändern sich in den folgenden Wochen und Monaten (Mai - Juli) nur kaum. Im Bereich des Red-Edge findet sich in diesem Zeitraum jedoch noch eine hohe Variabilität in der Reflexionsintensität.

Eine weitere Besonderheit ist die Möglichkeit einer hohen zeitlichen Auflösung, denn unter Berücksichtigung aller fünf Satelliten und der Schwenkbarkeit der Sensoren ist theoretisch jedes Gebiet der Erde innerhalb eines Tages erfassbar. Gegenüber den langfristigen Aktualisierungszyklen der hochauflösenden Bilddaten (häufig bis zu 5 Jahre bei Luftbild-DOPs) bietet das RapidEye-System die Möglichkeit der schnellen Überwachung, insbesondere bei räumlich begrenzten Änderungen der Agrarlandschaft, z. B. bei Versicherungsfällen infolge von Unwetterereignissen, aber auch bei Flurbereinigungsmaßnahmen nach Einrichtung von Siedlungs- und Gewerbegebieten oder Straßenbaumaßnahmen.

### 1.4 Testgebiet

Das Testgebiet HAMM war eine von drei nordrhein-westfälischen InVeKoS-Kontrollzonen des Jahres 2008. Es hat seinen Mittelpunkt im Gebiet der Stadt Hamm in Westfalen. Die landwirtschaftliche Nutzung zeigt einen großen Anteil von Mais- (23 % der ha-Fläche), Getreideflächen (50 % der ha-Fläche) und Grünland (17 % der ha-Fläche). Von den rund 3100 Landschaftselementen sind über 2500 CC-LE, die übrigen ca. 600 sind allgemeine LE. Die häufigsten sind Hecken (75 % der CC-LE), Baumreihen (11 % der CC-LE) und Feldgehölze (11 % der CC-LE), die damit nahezu die Gesamtheit aller CC-LE in dieser Zone abdecken. Aus dieser Kontrollzone

wurde für die vorliegenden Untersuchungen ein ca. 70 km<sup>2</sup> großer, rechteckiger Ausschnitt (6,5 km x 10,7 km) ausgewählt (Abb. 1).

## 1.5 Bilddaten

Als Bilddaten stehen die im Rahmen der InVeKoS-Kontrolle aufgenommenen digitalen Luftbilder sowie die daraus abgeleiteten, simulierten RapidEye-(RE)-Daten zur Verfügung. Beide werden im Folgenden näher charakterisiert.

Am 10.05.2008 wurden digitale Luftbilder von der Fa. RWE-Power AG mittels einer Digital Mapping Camera (DMC) für die Kontrollzone HAMM erstellt. Diese sind mit einer Zielauflösung von 1 m pro Pixel zu digitalen Orthophotos aufbereitet worden. Digitale Luftbilder sind hinsichtlich der Radiometrie den analogen Echtfar- bzw. CIR-Bildern deutlich überlegen. Dies ist zum einen durch die Direktaufnahme begründet, zum anderen entfallen bei der Digitalaufnahme die Prozessschritte „Entwicklung“ und „Scannen“, die jeweils für sich das Rauschen innerhalb der Bilder verstärken. Daneben existiert durch den Wegfall von Filmentwicklung und Scannen ein Zeitvorteil bei der Produktion der digitalen Orthophotos.

Die mit einer geometrischen Auflösung von 1 m pro Pixel vorliegenden Bilddaten wurden mit dem Modul „Image Degradation“ der Software Erdas Image 9.1 mit einer geometrischen Auflösung von 5 m pro Pixel neu berechnet (Abb. 1). „Image Degradation“ mittelt alle originalen Grauwerte der Ausgangspixel und errechnet so den Grauwert der Zielauflösung (LEICA 2006). Da aufgrund des RapidEye-Starts im August 2008 noch keine Bilddaten aus dem späten Frühjahr oder Frühsommer vorliegen können, die für die hier skizzierte Fragestellung als ideal anzusehen sind, war eine Simulation der RapidEye-Daten für ein nordwestdeutsches Testgebiet notwendig.



Abb. 1: Übersicht über das Testgebiet in der Kontrollzone HAMM, simulierte RapidEye-Daten

## 1.6 Referenzdaten

Die Feldblockdaten des Testgebietes wurden vom technischen Prüfdienst der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen bereitgestellt. Sie umfassen alle verfügbaren Feldblöcke (FEB) und Landschaftselemente (LE) in einem Umkreis von 50 km um den Mittelpunkt der InVeKoS-Kontrollzone HAMM. Jeder FEB ist durch ein Polygon mit einer eindeutigen ID gekennzeichnet und beschreibt eine zusammenhängende, landwirtschaftlich nutzbare Fläche, die durch Wasser-, Wald-, Wege- oder andere versiegelte Flächen von benachbarten FEB getrennt ist. Jeder FEB kann mehrere verschiedene Nutzungen nebeneinander tragen, die von verschiedenen Antragstellern bewirtschaftet werden.

Die Landschaftselement-Referenzen werden ebenfalls durch eindeutig gekennzeichnete Polygone beschrieben, die mit einer gemeinsamen Grenze an einen oder mehrere FEB angrenzen. Jedes LE ist als eines von dreizehn verschiedenen Typen attribuiert und kann durch einen oder mehrere Antragsteller (dann jeweils anteilig) in Zusammenhang mit einem angrenzenden Schlag auf einem FEB beantragt werden. Für die Durchführung der manuellen Testdigitalisierung wurden Cross-Compliance-relevante Landschaftselemente der Klassen „Hecke“, „Baumreihe“ und „Feldgehölz“ ausgewählt, da es theoretisch möglich ist, diese rein anhand der im Bild vorhandenen Informationen zu identifizieren.

## 2 Methodische Grundlagen der Potentialanalyse

### 2.1 Manuelle Bildinterpretation von Landschaftselementen mit simulierten RapidEye-Daten

#### 2.1.1 Auswahl von Referenzobjekten

Aus dem ca. 70 km<sup>2</sup> großen Testgebiet wurden Landschaftselemente ausgewählt, deren Abgrenzungen sich aus den örtlichen Gegebenheiten ableiten und nicht durch antragsbezogene Angaben definiert werden. So müssen z. B. die Flächen aller Feldgehölze einer im Luftbild nachvollziehbaren Form entsprechen, die Abgrenzung der Referenzobjekte darf also nicht nur aus zusätzlichen administrativen Daten hervorgehen. Für die Testdigitalisierung wurden anschließend aus der Gesamtheit der jeweiligen Klasse eine zufällige Auswahl von 25 Hecken, 25 Baumreihen und 21 Feldgehölzen ermittelt.

#### 2.1.2 Lineare Vorarbeiten und visuelle Kalibrierung des Bearbeiters

Um dem Testdigitalisierer einen Anhaltspunkt zu geben, welche Bereiche eines Landschaftselements zu erfassen sind, wurden die Referenzobjekte in Form von Polylinien abstrahiert, die den Standort und die ungefähre Ausdehnung der Objekte repräsentieren (Abb. 2, links). Diese Form der Vorarbeit ist für die Orientierung des Testdigitalisierers notwendig, da z. B. Hecken und Baumreihen nicht immer nur als I-förmig sondern vielfach u. a. auch als L- oder Z-förmige Elemente vorliegen. Für die Feldgehölze wurde ebenfalls eine Lokalisierung des zu erfassenden Objektes realisiert, indem der zu erfassende Feldgehölzbereich in seiner Ausdehnung mit einer diagonalen Polylinie markiert wurde (Abb. 2, rechts). Die Diagonale ermöglicht auf diese Weise eine gute Definition des zu digitalisierenden Bereiches, ohne jedoch zu stark die Außengrenze des Objektes vorzugeben. Um dem Testdigitalisierer die Möglichkeit zu geben, sich auf das Bildmaterial und die Aufgabenstellung einzustellen, wurde ein Datensatz zur Verfügung gestellt, der eine Sammlung von unabhängigen Referenzelementen enthielt.

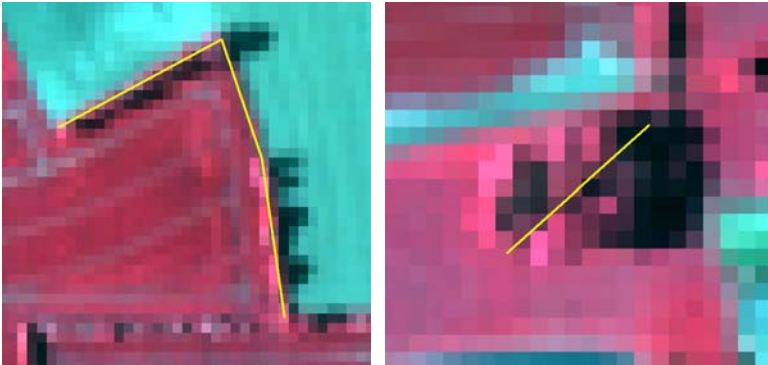


Abb. 2: Lineare Vorarbeiten für Hecken (links) und Feldgehölze (rechts), simulierte RapidEye-Daten

### 2.1.3 Flächenhafte Erfassung & thematische Interpretation

Die Erfassung der Landschaftselemente auf Grundlage der simulierten RapidEye-Daten erfolgte analog zum Vorgehen bei den InVeKoS-Kontrollen (die im Rahmen der Fernerkundungskontrollen bei der EFTAS GmbH durchgeführt werden) unter Zuhilfenahme der Feldblockdaten (Kap. 1.6), an die die zu erfassenden Polygone analog zu den InVeKoS-Kontrollen (Kap. 2.2) angepasst wurden. Die Interpretation umfasste die geometrische Abgrenzung der Objekte sowie die thematische Interpretation der Landschaftselemente (Hecke, Baumreihe, Feldgehölz). Wenn ein Referenzobjekt nicht ausreichend geometrisch oder thematisch bestimmt werden konnte, wurde eine vierte Klasse „nicht bestimmbar“ vergeben.

## 2.2 Durchführung der automatisierten Klassifikation simulierter RapidEye-Daten

Die automatisierte Erfassung der Landschaftselemente erfolgt anhand einer objektbasierten Klassifikation (BAATZ & SCHÄPE 1999), der eine Modellierung der zu klassifizierenden Objekte (in diesem Fall: Landschaftselemente) in mehreren Ebenen (Real-, Bild-, Geometrie-/Material- und GIS-Ebene) vorausgeht (TÖNJE 1999). Diese Modellierung wird um Definitionen aus der Landschaftsökologie und den CC-Verordnungen ergänzt (VÖLKER & MÜTERTHIES 2008). Die Klassifikation erfolgt unter Berücksichtigung spektraler, struktureller und textueller Informationen, deren flexibler Klassifikationsansatz ursprünglich für CIR-DOPs entwickelt (EBD.) und im Rahmen der vorgestellten Arbeiten für die simulierten RapidEye-Daten erweitert wurde.

## 3 Erste Ergebnisse

### 3.1 Geometrische Auswertung der manuellen Ergebnis- und Referenzobjekte

Die geometrische Übereinstimmung der anhand der simulierten RapidEye-Daten digitalisierten Ergebnisobjekte (Gesamtfläche: ca. 3,4 ha) wurde durch eine Verschneidung (Abb. 3) mit den vorhandenen Referenzobjekten (Gesamtfläche: ca. 4,0 ha) quantifiziert (Gesamtfläche der Überschneidung: ca. 2,7 ha). Die Auswertung ergab, dass einerseits 77 % der Referenzobjekt-Flächenanteile mit den zugehörigen Ergebnisobjekten übereinstimmen und andererseits 80 % der Ergebnisobjekt-Flächen in den zugehörigen Referenzobjekten enthalten waren.

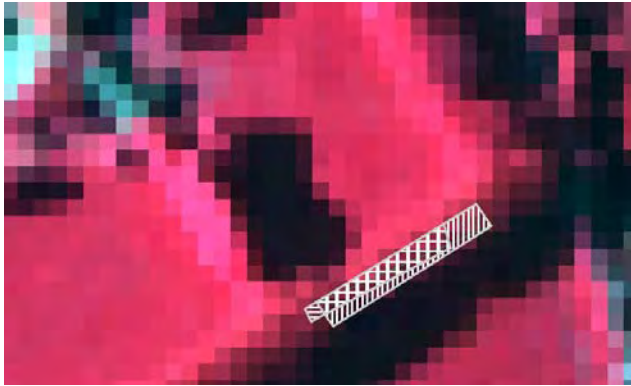


Abb. 3.: Verschneidung des Digitalisierungsergebnisses mit den Referenzdaten (Digitalisierung [horizontale Schraffur], Referenz [vertikale Schraffur], Überschneidung [Kreuzschraffur]), simulierte RapidEye-Daten

Fast die Hälfte (48 %) der 71 Ergebnisobjekte lag innerhalb des Intervalls von  $> 75\%$  bis  $\leq 125\%$  und war somit von der Fläche her vergleichbar zu den Referenzgeometrien und folglich weitestgehend vollständig erfasst (Abb. 4).

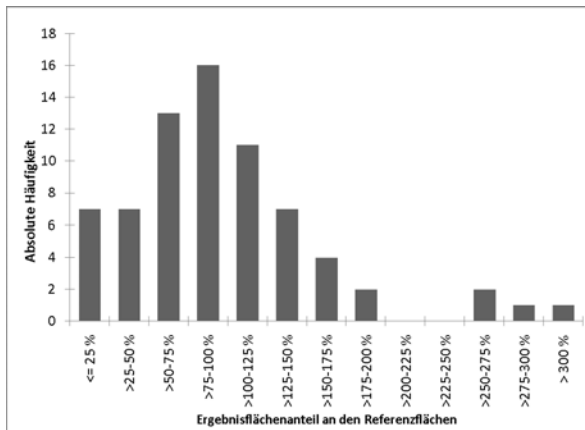


Abb. 4: Histogramm des Flächenanteils der Ergebnisobjekte an den zugehörigen Referenzflächen [in %]

Lediglich ca. ein Fünftel ist mit  $\leq 50\%$  der Fläche deutlich kleiner als die zugehörige Referenz. Die jeweilige Referenz wurde in diesen Fällen somit nicht ausreichend vollständig erfasst. Ca. ein Zehntel ist mit  $> 150\%$  der Fläche deutlich größer als die zugehörige Referenzfläche. Sie ist in diesen Fällen demzufolge zwar vollständig repräsentiert, es liegen darüber hinaus jedoch Er-

gebnisflächen außerhalb der eigentlichen Referenz vor, die somit in fälschlicher Weise zu viel erfasst wurden.

### 3.2 Thematische Auswertung der manuellen Ergebnis- und Referenzgeometrien

Nach der geometrischen Erfassung und thematischen Interpretation der Landschaftselemente wurden die Ergebnisse anhand der vorhandenen Referenzgeometrien ausgewertet. Die thematische Auswertung erfolgte anhand einer klassenweisen Gegenüberstellung der neu digitalisierten Objekte mit ihren zugehörigen Referenzgeometrien (Tab. 2).

Tab. 2: Gegenüberstellung der erfassten Klassen und der Referenzklassenzugehörigkeit

		Ergebnis			
		Hecke	Baumreihe	Feldgehölz	nicht abgrenzbar oder interpretierbar
Referenz	Hecke	88 %	0 %	0 %	12 %
	Baumreihe	56 %	36 %	0 %	8 %
	Feldgehölz	24 %	5 %	48 %	24 %

Keine der Hecken wurde fehlklassifiziert, lediglich 12 % der Hecken-Objekte konnten nicht abgegrenzt oder interpretiert werden. Jedoch wurde über die Hälfte (56 %) der Baumreihen falsch als Hecke klassifiziert, lediglich etwas über ein Drittel (36 %) wurden korrekt klassifiziert. Mit 48 % wurde fast die Hälfte aller Feldgehölze thematisch richtig erfasst, allerdings findet sich hier auch die höchste Quote (24 %) der nicht abgrenzbaren oder nicht interpretierbaren Objekte. Außerdem wurde fast jedes vierte Feldgehölz falsch als Hecke klassifiziert.

### 3.3 Auswertung der automatisierten LE-Erfassung

Die Auswertung der automatisierten Klassifikationsergebnisse (Abb. 5) erfolgt an dieser Stelle rein qualitativ, quantitative Ergebnisse liegen zu diesem Zeitpunkt der Studie nicht vor.

Die spektralen Besonderheiten der RapidEye-Daten (Red-Edge) konnten anhand der DMC-Datengrundlage nicht simuliert werden, so dass die Klassifikation bzgl. ihrer spektralen Charakteristika keine wesentlichen Abweichungen zur Klassifikationsstrategie bzgl. der CIR-Luftbilddaten aufweist.

Für die strukturellen Aspekte der Klassifikation spielt insbesondere die deutlich geringere geometrische Auflösung eine wichtige Rolle, da z. B. sehr schmale Heckenstrukturen häufig nicht erkannt werden können. Für die Ausmaskierung der Agrarflächen werden FEB-Daten genutzt, die im Rahmen der Klassifikation auf die Bildauflösung gerastert werden, so dass vormals bereits sehr schmale Polygone (z.B. Hecken oder Baumreihen < 5 m) in den FEB-Geometrien gerastert häufig nur noch isoliert oder als in Treppen angeordnete Kleinstpolygone zur Verfügung stehen.

Die Einbindung von Texturparametern verliert trotz der geringeren geometrischen Auflösung nicht ihre wesentliche Bedeutung für den Gesamtprozess. Die Kronenbereiche der Hecken und Bäume können nach wie vor über ihre Textur definiert werden, da die geringere Bildauflösung noch nicht zu einer zu starken Homogenisierung der Oberflächen führt, so dass der aus der Grey Level Co-Occurrence Matrix (HARALICK 1973) abgeleitete Texturparameter „Homogenität“ ein wesentlicher Baustein für die Klassifikation beliebiger Vegetationsoberflächen bleibt.



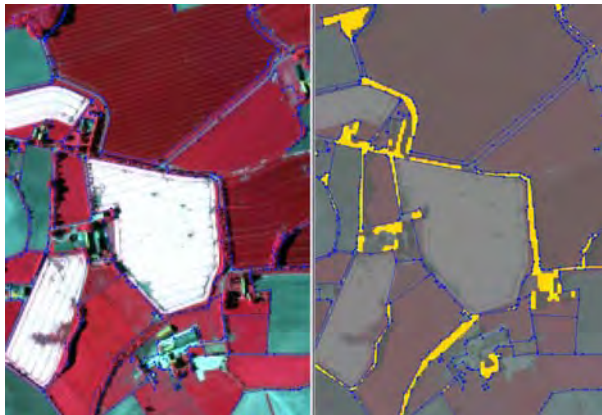


Abb. 5: Simulierte RapidEye-Daten (links), Ausschnitt aus dem Ergebnis der automatisierten Klassifikation - Hecke/Baumreihe (rechts), beide mit überlagerten Feldblockdaten

## 4 Ergebnisdiskussion

### 4.1 Diskussion der manuellen Erfassungsergebnisse

Die ersten Auswertungen zeigen, dass im Rahmen der geometrischen Auflösung anhand der simulierten RapidEye-Daten viele Landschaftselemente manuell gut abgegrenzt werden können, was sich daran zeigt, dass ca. die Hälfte der Ergebnisflächen tendenziell mit den Referenzflächen übereinstimmt (Abb. 4). Es ist im Rahmen der weiteren Analysen notwendig, die Ursachen für die deutlich zu klein bzw. zu groß erfassten Objekte aufzuzeigen und darzustellen. Hier muss gezeigt werden, ob diese Abweichungen sich anhand der unterschiedlichen Bilddatengrundlage erklären lassen oder ob weitere Gründe vorliegen.

Bei der thematischen Klassifikation wurde keine echte Hecke falsch interpretiert. Aus Sicht der Baumreihen-Referenzflächen ist die Unterscheidung zwischen Hecke und Baumreihe jedoch häufig nicht mehr eindeutig zu treffen. Feldgehölze sind oft nicht abgrenzbar oder interpretierbar. Hier können klassenweise Analysen im weiteren Verlauf der Untersuchungen genaueren Aufschluss darüber geben, welche der Unstimmigkeiten sich auf bildbezogene Ursachen zurückführen lassen und welche sich auf einen interpretatorischen Spielraum beziehen.

Neben den beschriebenen quantitativen Ergebnissen ist eine qualitative Einschätzung der Ergebnisdaten und des Digitalisierungsprozesses notwendig:

Im Rahmen der Digitalisierung wurde deutlich, dass aufgrund der geringen geometrischen Auflösung der Bildausschnitt vom Bearbeiter häufiger verkleinert bzw. vergrößert werden muss, um eine Orientierung im Bild und eine Abschätzung von Größenverhältnissen und strukturellen Zusammenhängen zu gewährleisten.

Für die Interpretation der Klassen Hecke oder Baumreihe spielen bei der geringen geometrischen Auflösung der Bilddaten deutlich sichtbare Schattenbereiche eine wichtige Rolle, da nur so eine ungefähre Aussage über die Höhe des jeweiligen Objektes abgeleitet werden kann, da sich in den Bilddaten die tatsächlichen belaubten Oberflächen dieser beiden Klassen zu ähnlich sind, um eine Differenzierung zu ermöglichen. Dieses Merkmal ist jedoch nicht eindeutig, da je nach Ausrichtung der Objekte zur Sonne mehr oder weniger große Schattenbereiche vorliegen. Ein anderer Befliegungszeitraum kann deutlich geringere oder intensivere Schattenwürfe liefern.

In den 5 m-Daten ist nicht erkennbar, ob und in welchem Umfang bzw. in welche Richtung entlang von Straßen eine Verkippung von Baumkronen vorliegt. Eine Orientierung bei der Erfassung war hier häufig lediglich anhand der linearen Vorarbeiten möglich.

Die aus der geringen geometrischen Auflösung resultierende Detailunschärfe hat zur Folge, dass sehr niedrige Heckenstrukturen, die auf den Stock gesetzt sind oder bereits geringfügig nachgewachsen sind, nicht mit ausreichender Sicherheit von Feldrainen und anderen Randstrukturen differenziert werden können. Wichtig für die Einordnung der thematischen und geometrischen Feldgehölz-Ergebnisse ist, dass zum einen durch die diagonale lineare Vorarbeit bereits ein Hinweis auf das Vorliegen eines Feldgehölzes gegeben ist und oft zusätzlich aufgrund der Insel-lage der Feldgehölze innerhalb der Feldblockdaten die Möglichkeit zur Erfassung einer Gehölz-geometrie bereits auf das vorhandene Feldblock-„Loch“ eingeschränkt war.

Insgesamt ist zu beachten, dass alle manuell erfassten Datengrundlagen, in diesem Falle sowohl die Ergebnis- als auch die Referenzobjekte, stets einem Interpretationsspielraum unterliegen. Dieser ist durch detaillierte Klassendefinitionen, visuelle Eichung anhand der Bilddaten und weitere Vorgaben zur Entscheidungsobjektivierung zwar zu minimieren, nie jedoch vollständig zu vermeiden. An dieser Stelle bilden die im Folgenden diskutierten automatisierten Klassifikationsmethoden einen wesentlichen Baustein zur Standardisierung der Erfassung von Landschaftselementen.

## 4.2 Diskussion der automatisierten Erfassungsergebnisse

Die ersten Ergebnisse zeigen, dass Landschaftselemente, die breiter als 5 m sind, gut erfasst werden können. Bei schmalen Objekten führen insbesondere die Abschnürungen durch gerasterte Feldblockdaten zu Fehlern bei der Erfassung. Auch spielen für das Potential der Automatisierung naturräumliche Aspekte eine Rolle, da die Ausdehnung insbesondere von Hecken regional sehr stark variiert. Methodisch zeichnet sich ab, dass trotz der deutlich geringeren geometrischen Auflösung Texturparameter für die Klassifikation von Kronenbereichen und belaubter Vegetation zielführend sind und somit keine umfangreichen Umstrukturierungen in der Klassifikationsmethodik notwendig sind. Eine spätere Untersuchung der spektralen Unterscheidbarkeit von Landschaftselementen gegenüber anderen Vegetationsflächen anhand echter RapidEye-Daten (insb. des Red-Edge-Kanals) dürfte dennoch äußerst aufschlussreich sein, um ggf. die hier verwendete Klassifikationsstrategie durch die direkte Nutzung von Spektralwerten zu unterstützen.

Eine automatisierte Klassifikation kann einen Beitrag zur Objektivierung von Monitoringergebnissen liefern, indem sie transparente und standardisierte Erfassungsmethoden zur Verfügung stellt (LANG 2007). Im vorliegenden Fall des CC-Landschaftselemente-Monitorings ist ein Change-Detection-Ansatz denkbar, der die vorliegenden LE-Referenz-geometrien anhand des Klassifikationsergebnisses automatisch auf ihre thematische Plausibilität prüft und sie anhand eines Vergleichs ihrer Grundfläche in die Kategorien „plausibel“, „unklar“ und „unplausibel“ einordnet. Dies bringt den Vorteil, dass eine manuelle Kontrolle der Landschaftselemente sehr viel zielgerichteter und effizienter erfolgen kann, als die derzeitige intensive Gleichbehandlung

aller LE, indem der Fokus der Kontrollen auf den unklaren Landschaftselementen liegt. RapidEye-Daten stellen hierfür ggf. eine gute Datengrundlage dar. Hierzu werden in Kürze weitere Auswertungen folgen.

## 5 Fazit

Die ersten Ergebnisse der hier vorgestellten Potentialanalyse zeigen auf, dass RapidEye-Daten es den Agrarverwaltungen ermöglichen könnten, kostengünstige und kurzfristige Kontrollen zu beauftragen und durchzuführen, um einen aktuellen Überblick über die Ausstattung der Landschaft mit Landschaftselementen zu erhalten. Es wird nicht die geometrische und thematische Genauigkeit sehr hochauflösender Bilddaten erreicht, jedoch lassen die ersten Ergebnisse erhoffen, dass eine Nutzung der Daten für Change-Detection-Verfahren und zur LE-Verifikation dazu führt, dass mit ausreichender Sicherheit Trends und Veränderungen in der Landschaft schnell und effizient erfasst werden können.

## 6 Literaturverzeichnis

- BAATZ, M. & SCHÄPE, A., 1999: Object-oriented and multi-scale image analysis in semantic networks. - Proceedings of the 2nd International Symposium on Operationalization of Remote Sensing, Enschede, ITC, August 16–20, 1999.
- HARALICK, R.; SHANMUGAM, K. & DINSTEN, I., 1973: Textural Features for Image Classification. - IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics (3/6): S. 610-621.
- LANG, S.; BLASCHKE, T., 2007: Landschaftsanalyse mit GIS. – 404 S., Ulmer-Verlag, Stuttgart.
- LEICA GEOSYSTEMS GEOSPATIAL IMAGING, 2006: Imagine Help. Norcross.
- RAPIDEYE AG, 2008: RapidEye Standard-Bilddatenprodukte. Online:  
[http://www.rapideye.de/upload/documents/brochures/002\\_Standard\\_Immagine\\_Products\\_GERM\\_web.pdf](http://www.rapideye.de/upload/documents/brochures/002_Standard_Immagine_Products_GERM_web.pdf) (abgerufen: 28.01.2009).
- TÖNJES, R., 1999: Wissensbasierte Interpretation und 3D-Rekonstruktion von Landschaftsszenen aus Luftbildern. - Fortschritt-Berichte VDI **1999** (10), 117 S., VDI-Verlag, Düsseldorf.
- VO (EG) 1782/2003 vom 29.09.2003 (Amtsblatt der EU, Nr. L270/2003, S. 1 - 69).
- VO (EG) 796/2004 vom 21.04.2004 (Amtsblatt der EU, Nr. L141/2004, S. 18 - 58).
- VÖLKER, A. & MÜTERTHIES, A., 2008: Landschaftsökologische Modellierung und automatisierte Erfassung von Landschaftselementen für das Monitoring und die Bewertung einer nachhaltigen Kulturlandschaft. In: Seyfert, E., Hrsg.: Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 17. Potsdam: S. 161-170.

# Zur Bewertung von Panschärfungsverfahren

UWE WEIDNER<sup>1</sup>

*Zusammenfassung:* Bei der Vielzahl von Verfahren zur Panschärfung multispektraler Daten ist es nur natürlich, dass die Frage nach der Bewertung ihrer Ergebnisse vermehrt behandelt wird. Von der IEEE Geoscience and Remote Sensing Society (GRSS) wird ein Wettbewerb für Panschärfungsverfahren durchgeführt. Das Ergebnis dieses Wettbewerbs des Jahres 2006 wurde in ALPARONE et al. (2007) veröffentlicht. Die Bewertung erfolgte u.a. auf der Grundlage der von WANG & BOVIK (2002) vorgestellten Kenngröße zum Vergleich einkanaliger Bilder, die von ALPARONE et al. (2004) zur Kenngröße Q4 auf der Grundlage von Quaternionen für vierkanalige Bilder erweitert wurde. ZHANG (2008) diskutiert diese Bewertung kritisch. Dies ist der Anlass, unsere Arbeiten (WEIDNER & MÜLLER 2006) wieder aufzugreifen. Der Fokus liegt hierbei auf der Panschärfung auf der Grundlage von optischen Daten und der Generalisierung der Kenngröße für mehrkanalige Daten mit beliebiger Anzahl von Kanälen.

## 1 Einleitung

Neben der Entwicklung von Verfahren zur Panschärfung multispektraler Daten wird in den letzten Jahren vermehrt die Frage nach der Bewertung ihrer Ergebnisse behandelt. Von der IEEE Geoscience and Remote Sensing Society (GRSS) wird zum Zweck einer solchen Bewertung und des Vergleichs von Panschärfungsverfahren für optische Fernerkundungsdaten ein Wettbewerb durchgeführt. Das Ergebnis dieses Wettbewerbs des Jahres 2006 wurde in ALPARONE et al. (2007) veröffentlicht. ZHANG (2008) diskutiert die dort durchgeführte Bewertung kritisch und stellt die Frage, inwieweit quantitative Kenngrößen eine Bewertung hinsichtlich der Anforderungen von unterschiedlichen Anwendungsszenarien für die pangeschärften Daten erlauben. Auf diese Problematik wurde auch schon in WEIDNER & MÜLLER (2006) hingewiesen.

In diesem Beitrag werden daher Ansätze und Kenngrößen zur Bewertung von Panschärfungsverfahren diskutiert (Abschnitt 2). Auf der Grundlage dieser Diskussion werden Kenngrößen ausgewählt und für die in Abschnitt 3 skizzierten einfachen Panschärfungsverfahren angewendet (Abschnitt 4). Der Fokus dieses Beitrags liegt auf der Panschärfung auf der Grundlage von optischen Daten. Bewertung der Datenfusion von optischen und Radardaten wird z.B. in KLONUS (2008) behandelt.

## 2 Ansätze zur Bewertung von Panschärfungsverfahren

WANG & BOVIK (2002) stellten einen Qualitätsindex zur Bewertung der Ähnlichkeit von zwei einkanaligen Bildern vor:

$$\rho_{WB} = \frac{4\sigma_{AB}\mu_A\mu_B}{(\sigma_A^2 + \sigma_B^2)(\mu_A^2 + \mu_B^2)} \quad (1)$$

1) Uwe Weidner, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Universität Karlsruhe(TH), Englerstraße 7, 76131 Karlsruhe; E-Mail: uwe.weidner@ipf.uni-karlsruhe.de

Hierin bezeichnen  $\mu_A$  und  $\mu_B$  die Mittelwerte,  $\sigma_A^2$  und  $\sigma_B^2$  die Varianzen und  $\sigma_{AB}$  die Kovarianz der beiden Bilder. Zur Verdeutlichung kann (1) umgeschrieben werden:

$$\rho_{WB} = \frac{\sigma_{AB}}{\sigma_A \sigma_B} \cdot \frac{2\mu_A \mu_B}{\mu_A^2 + \mu_B^2} \cdot \frac{2\sigma_A \sigma_B}{\sigma_A^2 + \sigma_B^2} \quad (2)$$

Der erste Term ist der Korrelationskoeffizient mit dem Wertebereich [-1,1]. Der zweite Term bewertet die Abweichung der Mittelwerte der beiden Grauwertbilder und der dritte den Kontrast. Für Grauwertbilder ist der jeweilige Wertebereich [0,1]. Der optimale Wert dieser Kenngröße ist 1. Negative Werte treten nur auf, wenn die die Korrelation negativ ist.

Eine Durchsicht von Bewertungsansätzen (vgl. WEIDNER & MÜLLER 2006) zeigt, dass die drei Terme aus (2) als einzelne oder auch in einem Satz von Kenngrößen genutzt werden. Der Korrelationskoeffizient wird u.a. von SANJEEVI et al. (2001), AIAZZI et al. (2003), GARZELLI et al. (2005) und CHIBANI (2006) genutzt, Größen basierend auf den Differenzen der Mittelwerte finden bei HSU & BURKE (2003) und LAPORTERIE DEJEAN et al. (2003) und Größen in Abhängigkeit des Kontrastes bei VIJAYARAJ et al. (2004) und NIKOLAKOPOULOS (2005) Anwendung. Werden mehrere dieser Kenngrößen zur Bewertung genutzt, ergeben sich zum Teil unterschiedliche Rangfolgen. Dies ist in der unterschiedlichen Sensitivität der Kenngrößen hinsichtlich der durch die Panschärfung hervorgerufenen Effekte begründet. Der Vorteil des Indexes  $\rho_{WB}$  nach WANG & BOVIK (2002) ist daher in der direkten Kombination der drei Terme in (2) und der damit erfassten Effekte zu sehen. ALPARONE et al. (2004) adaptierten diesen Index auf der Grundlage von Quaternionen für vierkanalige Bilder wie sie bei IKONOS und QuickBird vorliegen. Neben dieser als Q4 bezeichneten Kenngröße werden innerhalb des von der IEEE Geoscience and Remote Sensing Society (GRSS) durchgeführten Vergleichs ERGAS und SAM genutzt (ALPARONE et al. 2007). Die Nutzung von SAM – dem Winkel zwischen den durch die an einer Pixelposition gegebenen Spektralwerte definierten Vektoren des ungeschärften und des pangeschärften Datensatzes – ist dadurch begründet, dass dieses Kriterium für die Klassifizierung – insbesondere von hyperspektralen Daten – genutzt wird. Beide letztgenannten Kenngrößen sind für den Vergleich von Daten mit beliebiger Anzahl von Kanälen geeignet. Aus diesem Grund liegt es nahe, die von WANG & BOVIK (2002) vorgeschlagene Kenngröße für eine beliebige Anzahl von Kanälen zu erweitern. Eine solche Verallgemeinerung ist durch

$$\rho^* = \frac{4tr(\Sigma_{AB})|\underline{\mu}_A||\underline{\mu}_B|}{(tr(\Sigma_A) + tr(\Sigma_B))(|\underline{\mu}_A|^2 + |\underline{\mu}_B|^2)} \quad (3)$$

gegeben, wobei  $\underline{\mu}_A$  den Vektor der Mittelwerte der Kanäle des Datensatzes A bezeichnet,  $|\underline{\mu}_A|$  dessen Länge,  $\Sigma_A$  die Kovarianzmatrix des Datensatzes A und  $\Sigma_{AB}$  die Kovarianzmatrix der beiden zu vergleichenden Datensätze A und B.

In den meisten Ansätzen zur Bewertung der Panschärfung wird der gesamte Datensatz einbezogen. Negative Effekte einer Panschärfung zeigen sich aber häufig in den Kanten- oder nicht-homogenen Bereichen. Aus diesem Grund betrachtete PERKO (2004) mit dem Fokus auf die Prozessierung von Daten digitaler Luftbildkameras homogene und nicht-homogene Bereiche getrennt. Dies wurde schon in WEIDNER & MÜLLER (2006) aufgegriffen und soll auch in diesem Beitrag berücksichtigt werden.

ZHANG (2008) führt eine Bewertung von Panschärfungsverfahren visuell, quantitativ anhand von Kenngrößen und auf der Basis der Ergebnisse einer unüberwachten Klassifizierung (ISODATA)

durch. Wie WEIDNER & MÜLLER (2006) weist er auf die Schwierigkeiten bei den Bewertungsansätzen und auf die unterschiedlichen Rangfolgen hin, die sich aufgrund der verschiedenen Kriterien ergeben können. Darüber hinaus hinterfragt er die Aussagekraft solcher Kenngrößen an einem Beispiel. Hierzu vergleicht er linear transformierte Daten u.a. mittels Q4 und den Ergebnissen der unüberwachten Klassifizierung mittels ISODATA. Die Ergebnisse der unüberwachten Klassifizierungen unterscheiden sich nicht, jedoch zeigen sich deutliche Unterschiede bei den für die einzelnen Datensätze berechneten Kenngrößen Q4. Diese Unterschiede sind in den unterschiedlichen Mittelwerten und Varianzen begründet, die aus den linearen Transformationen folgen und in die Berechnung von Q4 einfließen. Die linearen Transformationen haben jedoch keinen Einfluss auf das Clustering. Dies gilt jedoch nicht für alle der Panschärfung nachfolgenden Verarbeitungs- und Auswertungsschritte. In dem von ZHANG (2008) diskutierten Fall stellt daher die Nutzung von Q4 bzw. höhere Anforderungen oder bewerten wie SAM gerade spezielle Eigenschaften, die für die nachfolgende Auswertung von Bedeutung sind.

### 3 Einfache Panschärfungsverfahren

In diesem Abschnitt werden einige einfache Ansätze zur Panschärfung zusammengestellt, deren Ergebnisse dann in Abschnitt 4 bewertet werden. Einige von ihnen wie das Verfahren nach Brovey wurden zur Fusion unterschiedlicher Datentypen eingeführt und lieferten in ihrer ursprünglichen Form im Hinblick auf die Panschärfung hochauflösender Daten unbefriedigende Ergebnisse. Dies ist im Wesentlichen dadurch bedingt, dass Eigenschaften der Daten nicht berücksichtigt wurden (vgl. OTAZU et al. 2005). Durch einfache Modifikationen lassen sich diese Verfahren jedoch verbessern. In Anlehnung an die Kategorisierung von ZHANG (2004) sollen vier Verfahrensgruppen unterschieden werden: 1) arithmetische Kombinationen, 2) Farbraumtransformationen, 3) orthogonale Transformationen und 4) frequenzbasierte Verfahren, wobei innerhalb der Verfahren der Kategorien 2) und 3) die Substitution eines transformierten Kanals durch den panchromatischen Kanal eine wesentliche Rolle spielt. Die kurze Beschreibung der Verfahren erfolgt in der Reihenfolge der obigen Kategorisierung. Im Folgenden bezeichnet  $C_{pan}$  den panchromatischen Kanal,  $C_i$  den i-ten originalen multispektralen Kanal und  $C_{i,pan}$  den jeweiligen pangeschärften Kanal. Weiterhin kann für die hier genutzten QuickBird-Daten

$$C_{pan} \propto \sum_j^n w_j C_j + e_s \quad (4)$$

angenommen werden (vgl. KALPOMA & KUDOH 2007). Hieraus folgt, dass die gewichtete Summe und die panchromatischen Daten mittels einer linearen Transformation wie einer Histogrammanpassung aufeinander abgebildet werden können. Diese Eigenschaft ist für alle auf einer Komponentensubstitution basierenden Verfahren von Bedeutung, denn für diese muss neben einer hohen positiven Korrelation

$$C_{pan} \propto C_{sub} + e_{sub} \quad (5)$$

gelten.

Das **Verfahren nach Brovey** gemäß

$$C_{i,pansh} = \frac{C_i}{C_{MSI}} C_{pan} \quad \text{mit } C_{MSI} = \sum_j^n C_j \quad (6)$$

ist für Daten mit einer beliebigen Anzahl von Kanälen anwendbar. Eine Verbesserung der Ergebnisse wird erzielt, wenn eine Gewichtung der Kanäle analog zu (4) berücksichtigt wird und eine Histogrammanpassung erfolgt – zum einen zwischen der gewichteten Intensität  $C_{wMSI}$  und dem panchromatischen Kanal  $C_{pan}$ , zum anderen zwischen den originalen multispektralen Kanälen  $C_i$  und den pangeschärften Kanälen  $C_{i,pan}$ . Somit ist beim Bewertungskriterium  $\rho^*$  im Wesentlichen der Anteil der Korrelation von Bedeutung.

Verfahren basierend auf einer **Hauptachsentransformation** gehören zur Gruppe der orthogonalen Transformationen. Die zur Substitution genutzte erste Hauptkomponente weist jedoch häufig nur eine geringe, zum Teil negative Korrelation mit dem panchromatischen Kanal auf, so dass auch eine lineare Transformation mittels Histogrammanpassung nicht zu einer hinreichenden Ähnlichkeit der auszutauschenden Kanäle und damit im Ergebnis zu Farbverschiebungen führt. Die Grundidee des nächsten Verfahrens ist daher, eine **orthogonale Transformation** durchzuführen, bei der die erste Komponente als gewichtetes Mittel unter Berücksichtigung von (4) berechnet wird und somit (5) erfüllt ist. Für vier Kanäle genügt eine Transformation mit

$$T_{OrthT} = \begin{pmatrix} t_1 & t_2 & t_3 & t_4 \\ t_4 & t_3 & -t_2 & -t_1 \\ t_3 & -t_4 & -t_1 & t_2 \\ t_2 & -t_1 & t_4 & -t_3 \end{pmatrix} \quad \text{mit } t_i = \frac{w_i}{\sum_j w_j} \quad (7)$$

diesen Anforderungen. Von Bedeutung sind die Elemente der ersten Zeile, die weiteren Zeilen folgen unter Berücksichtigung der Orthogonalität. Für die Ergebnisse in Abschnitt 4 wurde der NIR-Kanal mit doppeltem Gewicht berücksichtigt. Die Gewichte können auch auf Grundlage der Daten geschätzt werden (vgl. KALPOMA & KUDOH 2007).

Das nächste Verfahren gehört zur vierten Kategorie und führt eine **Panschärfung mittels linearer Filterung** durch. Wie bei THOMAS et al. (2008) wird hier ausgenutzt, dass ein Laplacegefiltertes Bild  $\Delta$  gleich der Differenz eines Gauß-gefilterten und des Originalbildes ist. Als Vorverarbeitung kann wiederum zuerst ein gewichtetes Mittel der multispektralen Daten berechnet und die panchromatischen Daten mittels Histogrammanpassung transformiert sowie ggf. zur Reduzierung des Rauscheinflusses eine Glättung durchgeführt werden. Anschließend wird das panchromatische Bild mittels Laplace gefiltert und mit den originalen multispektralen Daten kombiniert:

$$C_{i,pansh} = C_i - \quad (8)$$

Obwohl anders motiviert nutzen auch TU ET AL. (2004) und AIAZZI et al. (2007) diese Formel. Eine Alternative hierzu ist durch

$$C_{i,pansh} = C_i \frac{C_{wMSI} - \Delta}{C_{wMSI}} \quad (9)$$

gegeben.

## 4 Ergebnisse

Für die im vorherigen Abschnitt dargestellten Panschärfungsverfahren sind hier die Ergebnisse der Bewertung mittels des erweiterten Qualitätsindex  $\rho^*$  und SAM zusammengestellt. Als Datengrundlage dienten verschiedene Ausschnitte einer QuickBird-Szene von Karlsruhe (Datensatz A [Bebauung], B [Waldbereiche] und C [Fluss, Waldbereiche]) sowie eine Quickbird-Szene aus dem Benin (Datensatz D [ländliche und Lagunenbereiche]). Weiterhin wurde in Anlehnung an ZHANG (2008) eine unüberwachte Klassifizierung für einen der Datensätze durchgeführt.

Abb. 1 zeigt Ausschnitte und Tab. 1 die Kenngrößen von Datensatz A. Das Ergebnis der Hauptachsentransformation wird aufgrund der Farbverschiebungen insbesondere in Vegetationsbereichen deutlich schlechter als die anderen Verfahren bewertet. Die Kenngröße  $\rho^*$  ist für Kantenbereiche kleiner als für die homogenen Bereiche, was der Erwartung entspricht und auch durch visuelle Kontrolle bestätigt wird. Gerade an den Rändern von dunklen und Vegetationsbereichen treten Farbsäume auf. Die Reihung der Verfahren nach der Größe der Kenngröße ist für alle drei Fälle – gesamter Datensatz, Kantenbereiche, homogene Bereiche – für  $\rho^*$  identisch. SAM liefert bei der hier durchgeführten Untersuchung die gleiche Rangfolge der Verfahren. Zugleich zeigen sich jedoch zwei Punkte. Zum einen erfasst die Bewertung mittels des spektralen Winkels nicht alle Einflüsse der Panschärfung, zum anderen ist es ein Beispiel dafür, dass Verfahren speziell auf besondere Anforderungen angepasst werden können. Die beiden Alternativen für die hier vorgestellte Panschärfung mittels linearer Filterung führen für  $\rho^*$  auf vergleichbare Ergebnisse, jedoch wird bei der Alternative gemäß (9) der spektrale Winkel erhalten.

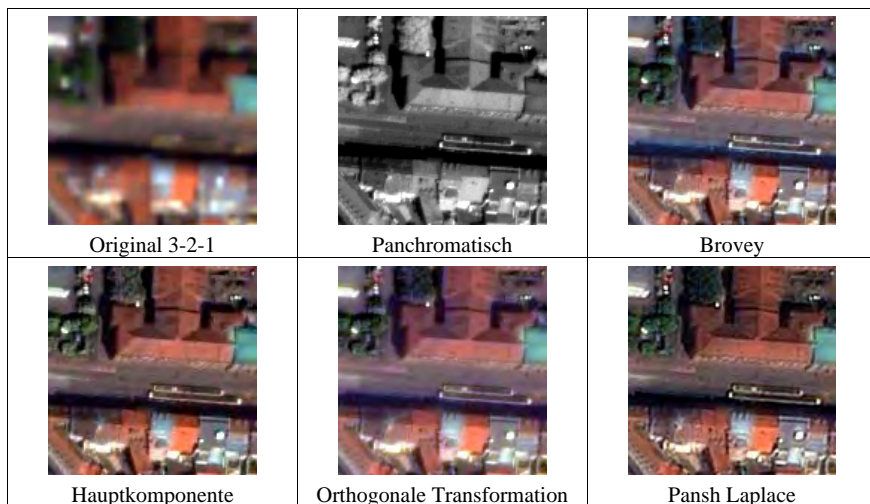


Abb. 1: Ausschnitt Datensatz A



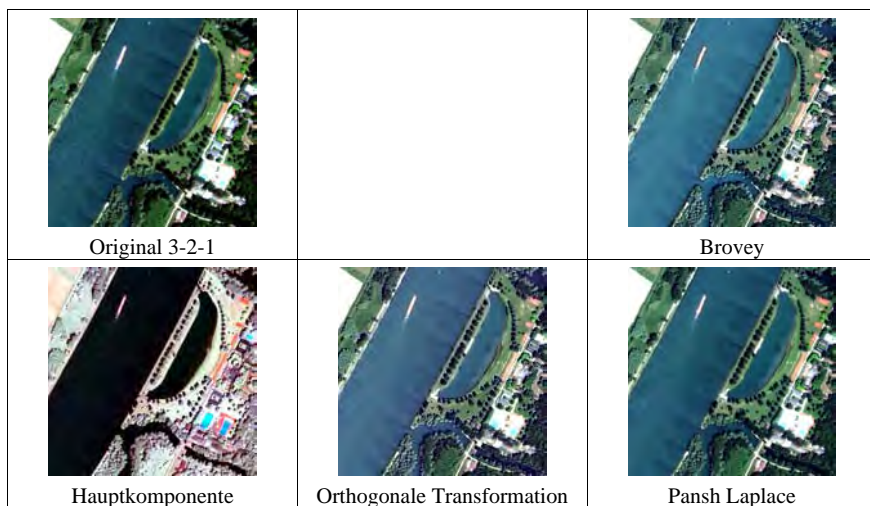


Abb. 2: Datensatz C

Tab. 1: Zusammenstellung der Bewertungskriterien Datensatz A

	$\rho^*$	$\rho^*$ (nicht-homogen)	$\rho^*$ (homogen)	SAM
Brovey	0,939	0,878	0,965	0,469
Hauptachsentransformation	0,855	0,825	0,864	5,167
Orthogonale Transformation	0,944	0,887	0,968	1,468
Pansh Laplace	0,968	0,922	0,988	0,000

Tab. 2: Zusammenstellung der Bewertungskriterien für weitere Datensätze

	Datensatz B		Datensatz C				Datensatz D	
	$\rho^*$	SAM	$\rho^*$	SAM	GG	$\kappa$	$\rho^*$	SAM
Brovey	0,957	0,677	0,983	0,457	0,825	0,769	0,958	0,684
Hauptachsentransformation	0,759	10,979	0,938	3,938	0,897	0,862	0,917	2,212
Orthogonale Transformation	0,959	1,165	0,984	1,061	0,751	0,672	0,959	1,165
Pansh Laplace	0,977	0,000	0,995	0,000	0,904	0,871	0,984	0,000

Die Bewertungskenngrößen für die weiteren Datensätze (Tab. 2) bestätigen die Ergebnisse, die für den Datensatz A festgestellt wurden. Zudem zeigt sich in beiden Kenngrößen deutlich die Datenabhängigkeit der Hauptachsentransformation (Abb. 2). Darüber hinaus wurde für Datensatz C, der wenige Klassen enthält, für jeden pangeschärften Datensatz eine unüberwachte Klassifizierung (k-Means) durchgeführt und mit dem Klassifizierungsergebnis auf der Grundlage der originalen multispektralen Daten verglichen (vgl. Tab. 1, GG = Gesamtgenauigkeit). Hierbei zeigten sich nicht nur Unterschiede an den Kantenbereichen, sondern bei einigen Panschärfungsverfahren auch für homogene Bereiche. ZHANG (2008) bezog nur linear transformierte Daten in

seine Betrachtung ein. Selbst bei den auf linearen Transformationen basierenden Verfahren erfolgt durch die Substitution eine nicht-lineare Veränderung der Daten. Die Reihung, die sich durch den Vergleich der Gesamtgenauigkeiten ergibt unterscheidet sich erheblich von der, die durch die Bewertungskriterien  $\rho^*$  und SAM folgt. Ein Grund hierfür ist die nicht immer einfach mögliche und zum Teil auch subjektive Zuordnung der Cluster zu den Objektklassen.

## 5 Zusammenfassung

Die von ALPARONE et al. (2004) vorgestellte Kenngröße Q4 bildet eine Grundlage für die durch die IEEE Geoscience and Remote Sensing Society (GRSS) durchgeführten Vergleiche von Panschärfungsverfahren. Diese Kenngröße wurde in diesem Beitrag für die Anwendung für Datensätze mit beliebiger Anzahl von multispektralen Kanälen erweitert. Im Vergleich zu anderen Kenngrößen erfasst sie eine Reihe von Effekten, die durch eine Panschärfung auftreten können und ist somit diesen überlegen. Die von ZHANG (2008) geäußerte Kritik an Kenngrößen kann nicht vollständig unterstützt werden, da die von ihm durchgeführten Betrachtungen auf sehr vereinfachten Annahmen beruhen. Dies zeigen die Ergebnisse eines Vergleiches auf der Grundlage einer unüberwachten Klassifizierung, auch wenn dadurch deutlich wird, dass Kenngrößen nicht alle Einflüsse, insbesondere nicht-lineare, adäquat bewerten und somit anwendungsbezogen für die weitere Auswertung jeweils spezielle Kenngrößen herangezogen oder gar nur die originalen Daten – insbesondere für Klassifizierungen – genutzt werden sollten.

## 6 Literaturverzeichnis

- AIAZZI, B.; ALPARONE, L.; BARONTI, S.; GARZELLI, A. & SELVA, M., 2003: An MTF-based spectral distortion minimizing model for pan-sharpening of very high resolution multispectral images of urban areas. 2nd GRSS / ISPRS Workshop on Data Fusion and Remote Sensing over Urban Areas, pages 90 - 94
- AIAZZI, B.; BARONTI, S. & SELVA, M., 2007: Improving component substitution pansharpening through multivariate regression of MS+pan data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45(10):3230 - 3239
- ALPARONE, L.; BARONTI, S.; GARZELLI, A. & NENCINI, F., 2004: A global quality measurement of pan-sharpened multispectral Imagery. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 1(4):313 - 317
- ALPARONE, L.; WALD, L.; CHANUSSOT, J.; THOMAS, C.; GAMBA, P. & BRUCE, L.M., 2007: Comparison of pansharpening algorithms: Outcome of the 2006 GRS-S data-fusion contest. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45(10):3012 - 3021
- CHIBANI, Y., 2006: Additive integration of SAR features into multispectral SPOT images by Means of the à trous wavelet decomposition. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 60(5):306 - 314
- GARZELLI, A.; NENCINI, F.; ALPARONE, L. & BARONTI, S., 2005: Multiresolution fusion of multispectral and panchromatic images through the curvelet transform. IGARSS 2005, Seoul
- HSU, S.M. & BURKE, H.-H.K., 2003: Multisensor fusion with hyperspectral imaging data: Detection and classification. Lincoln Library Journal, Massachusetts Institute of Technology, 14(1):145 - 159

- KALPOMA, K.A. & KUDOH, J.-I., 2007: Image fusion processing for IKONOS 1-m color imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(10):3075 - 3086
- KLONUS, S., 2008: Comparison of pansharpening algorithms for combining radar and multispectral data. *IAPRSIS*, Vol. 37, Part B6B, pages 189 - 194
- LAPORTERIE DEJEAN, F.; LATRY, C. & DE BOISSEZON, H., 2003: Evaluation of the quality of panchromatic / multispectral fusion algorithms performed on images simulating the future Pleiades Satellites. 2nd GRSS / ISPRS Workshop on Data Fusion and Remote Sensing over Urban Areas, pages 95 - 98
- NIKOLAKOPOULOS, K.G., 2005: Comparison of six fusion techniques for SPOT5 data. *IGARSS 2005*, Seoul
- OTAZU, X.; GONZALES-AUDICANA, M.; FORS, O. & NUNEZ, J., 2005: Introduction of sensor spectral response into image fusion methods. Application to wavelet-based methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(10):2376 - 2385
- PERKO, R., 2004: Computer vision for large format digital aerial cameras. PhD thesis, Institute for Computer Graphics and Vision, Graz University of Technology
- SANJEEVI, S.; VANI, K. & LAKSHMI, K., 2001: Comparison of conventional and wavelet transform techniques of IRS-1C LISS-III and Pan Images. 22nd Asian Conference on Remote Sensing, 5-9 November 2001, Singapore
- THOMAS, C.; RANCHIN, T.; WALD, L. & CHANUSSOT, J., 2008: Synthesis of multispectral images to high spatial resolution: A critical review of fusion methods based on remote sensing physics. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(5):1301 - 1312
- TU, T.-M.; HUANG, P.S.; HUNG, C.-L. & CHANG, C.-P., 2004: A fast Intensity-Hue-Saturation fusion technique with spectral adjustment for IKONOS imagery. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 1(4):309 - 312
- VIJAYARAJ, V.; O'HARA, G.O. & YOUNAN, N.H., 2004: Quality analysis of pansharpened images. *IGARSS 2004*, Anchorage
- WANG, Z. & BOVIK, A.C., 2002: A universal image quality index. *IEEE Signal Processing Letters*, 9(3):81 - 84
- WEIDNER, U. & MÜLLER, M., 2006: Pansharpening - Ein Beitrag zur quantitativen Bewertung. 26. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF 2006, Berlin-Adlershof, pages 221 - 228
- ZHANG, Y., 2004: Understanding image fusion. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(6):657 - 661
- ZHANG, Y., 2008: Methods for image fusion quality assessment - A review, comparison and analysis. *IAPRSIS*, Vol. 37, Part B7, pages 1101 - 1110

# Experimentelle Auswertung von Unsicherheitsmaßen auf relativen Posen für die Multikamerakalibrierung

FERID BAJRAMOVIC<sup>1</sup> & JOACHIM DENZLER<sup>2</sup>

*Zusammenfassung: Beim Zusammensetzen relativer Posen zur extrinsischen Kalibrierung eines Multikamerasystems können mittels informationstheoretischer Unsicherheitsmaße verlässliche relative Posen ausgewählt werden. Dadurch lässt sich die Genauigkeit der resultierenden Kalibrierung deutlich verbessern. In dieser Arbeit werden quantitative experimentelle Untersuchungen solcher Unsicherheitsmaße und des zugehörigen Kalibrieralgorithmus durchgeführt. Dabei wird analysiert, wie sehr die Unsicherheitsmaße mit dem Fehler in den geschätzten relativen Posen korrelieren. Außerdem wird der Vorteil dieser Auswahl relativer Posen im Vergleich zu einer naiven oder zufälligen Auswahl aufgezeigt, wobei auch der Einfluss mehrerer Parameter untersucht wird. Im Median wird eine Verbesserung um bis zu Faktor vier erreicht.*

## 1 Einleitung

Multikamerasysteme spielen im Rechnersehen (Computer Vision) eine zunehmend wichtige Rolle. Eine wichtige Voraussetzung für viele Anwendungen, wie 3-D-Rekonstruktion oder Multikameraobjektverfolgung, besteht darin, das Multikamerasystem zuvor zu kalibrieren. Bestehende Verfahren lassen sich anhand der verwendeten Eingabedaten grob in drei Klassen einteilen: 1. Musterbasiert: ein klassisches (planares) Kalibriermuster muss in allen Kameras sichtbar sein (ZHANG, 2000) oder die Posen mehrerer Kalibriermuster müssen zueinander bekannt sein (KITAHARA et al., 2001). 2. LED-basiert: ein einfach zu detektierendes, sich bewegendes Merkmal, wie z.B. eine LED in einem abgedunkelten Raum, wird über die Zeit hinweg aufgenommen (BAKER & ALOIMONOS, 2000, SVOBODA et al., 2005, CHEN et al., 2000, BARRETA & DANILIDIS, 2004). 3. Selbstkalibrierung (im weiteren Sinne): Bilder werden von einer unbekannten Szene aufgenommen, die typischerweise eine gewisse (unbekannte) 3-D-Struktur und Texturen enthalten muss (MARTINEC & PAJDLA, 2007, VERGÉS-LLAHÍ et al., 2008, BAJRAMOVIC & DENZLER, 2008B).

Rein vom Standpunkt der Multiansichtengeometrie kann die Multikamerakalibrierung als Struktur-aus-Bewegungs-Teilproblem aufgefasst werden (HARTLEY & ZISSERMAN, 2003). Bei der Selbstkalibrierung mehrerer realer Kameras besteht allerdings das Problem, dass Punktkorrespondenzen automatisch aus Bildern mit stark unterschiedlicher Perspektive extrahiert werden müssen, was oft zu vielen Falschzuordnungen (Ausreißern) führt. Eine viel versprechende Teilklasse der Selbstkalibrierungsverfahren schätzt zunächst aus Punktkorrespondenzen relative Posen zwischen einigen Kamera paaren und setzt diese

---

<sup>1</sup> Ferid Bajramovic, E-Mail: [ferid.bajramovic@informatik.uni-jena.de](mailto:ferid.bajramovic@informatik.uni-jena.de)

<sup>2</sup> Prof. Dr.-Ing. Joachim Denzler, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fakultät für Mathematik und Informatik, Lehrstuhl für Digitale Bildverarbeitung, Ernst-Abbe-Platz 2, 07743 Jena, E-Mail: [denzler@informatik.uni-jena.de](mailto:denzler@informatik.uni-jena.de), Internet: [www.inf-cv.uni-jena.de](http://www.inf-cv.uni-jena.de)

anschließend zur Kalibrierung des Gesamtsystems zusammen. Die Motivation dafür besteht darin, dass relative Posen auch aus Korrespondenzen mit vielen Ausreißern meist zuverlässig geschätzt werden können (STEWÉNIUS et al., 2006, BRÜCKNER et al., 2008). Die Güte der Gesamtkalibrierung wird natürlich stark von der Güte der relativen Posen abhängen. Eine kurze Erwähnung fand dieser Aspekt in (CHEN et al., 2000). Eine ausführlichere Behandlung ist in (MARTINEC & PAJDLA, 2007, MARTINEC & PAJDLA, 2006) zu finden. Dort werden relative Posen gewichtet anhand ihrer „Wichtigkeit“ und der Größe ihrer Unterstützungsmenge (support set), die durch den RANSAC-Algorithmus (FISCHLER & BOLLES, 1981) bestimmt wird. Das Verfahren von (VERGÉS-LLAHÍ et al., 2008) wählt relative Posen mittels eines Unsicherheitsmaßes und eines graphentheoretischen Kriteriums aus. Für die Auswahl relativer Posen werden kürzeste Dreieckspfade in einem Graphen bestimmt, der Kameras, geschätzte relative Posen und deren Unsicherheiten enthält.

Dieses Vorgehen wird in (BAJRAMOVIC & DENZLER, 2008B, BAJRAMOVIC & DENZLER, 2008A) aufgegriffen. Es werden drei theoretisch fundierte Unsicherheitsmaße auf Basis einer probabilistischen Auswertung des Raums möglicher relativer Posen (ENGELS & NISTÉR, 2005) vorgeschlagen. Auf Basis dieser Unsicherheitsmaße wird ein Auswahlkriterium für relative Posen beschrieben, das eine theoretische Rechtfertigung für das zuvor genannte Verfahren liefert. Außerdem wird ein effizienter Algorithmus für die Bestimmung kürzester Dreieckspfade beschrieben, sowie ein Auswahlkriterium für das Referenzkamerapaar.

In dieser Arbeit werden zusätzliche experimentelle Untersuchungen dieses Verfahrens durchgeführt. Insbesondere wird die Korrelation zwischen den Unsicherheitsmaßen und dem Fehler in den relativen Posen untersucht. Außerdem wird die Güte der Gesamtkalibrierung im Vergleich zu einer naiven Auswahl relativer Posen und einem zufälligen „Gütemaß“ bewertet. Dabei wird auch der Einfluss verschiedener Parameter des Verfahrens analysiert.

Die Arbeit ist wie folgt aufgebaut: in Abschnitt 2 wird das Kalibrierverfahren mit Auswahl relativer Posen kurz beschrieben. Die experimentellen Untersuchungen werden in Abschnitt 3 beschrieben. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung in Abschnitt 4.

## 2 Das Kalibrierverfahren

Ein Multikamerasystem und die Menge geschätzter relativer Posen lässt sich durch den *Kameraabhängigkeitsgraphen*  $G_k$  repräsentieren (VERGÉS-LLAHÍ et al., 2008): Jede Kamera wird zu einem Knoten und zwei Kameras werden verbunden, falls ihre relative Pose bekannt ist. Die Aufgabe besteht darin, aus den relativen Posen, die bis auf Skalierung bekannt sind, absolute Posen zu berechnen, die in einem beliebigen Weltkoordinatensystem mit beliebiger Skalierung ausgedrückt sind. Genauer gesagt ist eine Kalibrierung bis auf eine 3-D-Ähnlichkeitstransformation je Dreieckszusammenhangskomponente in  $G_k$  möglich (MANTZEL et al., 2004). In dieser Arbeit wird angenommen, dass  $G_k$  dreieckszusammenhängend ist. Ansonsten kann jede Dreieckszusammenhangskomponente einzeln behandelt werden.

### 2.1 Zusammensetzen relativer Posen mittels Triangulation und Konkatenation

Ein Dreieck in  $G_k$  besteht aus drei Kameras mit drei bekannten relativen Posen. Wenn die Skalierung eines Translationsvektors bekannt ist, so lassen sich die übrigen beiden mittels

Triangulation berechnen (HARTLEY & ZISSERMAN, 2003). Indem man ein Dreieck nach dem anderen behandelt, wobei aufeinander folgende Dreiecke immer eine gemeinsame Kante besitzen müssen, lassen sich alle Skalierungsfaktoren berechnen – bis auf den frei zu wählenden der ersten relativen Pose. Anschließend lassen sich die absoluten Posen durch Konkatenation aus den relativen Posen bestimmen. Als Hilfskonstrukt wird der Dreiecksgraph  $G_r$  eingeführt, der wie folgt definiert ist: Jedes Dreieck in  $G_r$  wird zu einem Knoten in  $G_r$  und zwei Knoten sind genau dann verbunden, wenn die beiden Dreiecke eine gemeinsame Kante in  $G_r$  haben. Ein einfaches Verfahren besteht darin, den Dreiecksgraph z. B. mittels Breitensuche zu traversieren und dabei mittels Triangulation und Konkatenation die absoluten Posen zu bestimmen.

Die Art der Traversierung von  $G_r$  ist nicht spezifiziert. Da insbesondere in einem dichten Kameraabhängigkeitsgraphen nur ein kleiner Teil der Dreiecke für das Zusammensetzen benötigt wird, impliziert die Traversierung eine Auswahl relativer Posen. Auf Basis von Unsicherheitsmaßen auf relativen Posen, die den Kanten in  $G_r$  als Gewichte zugewiesen werden, lässt sich ein Optimierungskriterium für Auswahl relativer Posen formulieren.

## 2.2 Unsicherheitsmaße auf relativen Posen

In (BAJRAMOVIC & DENZLER, 2008B) werden drei informationstheoretische Unsicherheitsmaße eingeführt auf Basis der Wahrscheinlichkeitsdichte  $p(R, t^* / D)$  der relativen Pose  $(R, t^*)$  gegeben die Menge der Punktkorrespondenzen  $D$ . Die Dichte wird dabei mittels der Blake-Zisserman-Verteilung (HARTLEY & ZISSERMAN, 2003) modelliert:

$$p(R, t^* / D) \propto \left( \prod_{d \in D} \left( \exp \left( -\frac{s(R, t^*, d)}{\sigma^2} + \phi \right) \right) \right)^{D/\phi} p(R, t^*). \quad (1)$$

Dabei bezeichnet  $\sigma$  die Standardabweichung der Normalverteilung,  $\phi$  das relative Gewicht der uniformen Verteilung,  $s(R, t^*, d)$  die Sampson-Approximation des Rückprojektionsfehlers (HARTLEY & ZISSERMAN, 2003) und  $\phi$  ist ein weiterer Parameter, der eine Abweichung von der oft üblichen Unabhängigkeitsannahme modelliert.

Mittels eines Sampling-Algorithmus auf Basis des Fünf-Punkte-Algorithmus (STEWÉNIUS et al., 2006), der RANSAC bzw. MLESAC ähnelt (FISCHLER & BOLLES, 1981, TORR & ZISSERMAN, 2000), wird eine diskret repräsentierte Approximation  $A$  der Randverteilung  $p(t^* / D)$  bestimmt (ENGELS & NISTÉR, 2005, BAJRAMOVIC & DENZLER, 2008B). Dabei ist  $A$  eine Matrix wählbarer Größe  $a \times a$ , deren Einträge die Wahrscheinlichkeit der entsprechenden Translationsrichtungen  $t^*$  angeben. Eine solche Repräsentation bietet sich an, da  $t^*$  zwei Freiheitsgrade mit endlichem Wertebereich besitzt. Außerdem berechnet der Sampling-Algorithmus noch eine Schätzung  $(\hat{R}, \hat{t}^*)$  der relativen Pose. Mittels der Ergebnisse des Sampling-Algorithmus werden gemäß (BAJRAMOVIC & DENZLER, 2008B) die folgenden drei Unsicherheitsmaße berechnet:

1. Die Information  $w_I(\hat{t}^*) = -\log(p(\hat{t}^* / D))$ .
2. Die Entropie  $w_E(\hat{t}^*) = -\sum_{k,l} A_{kl} \log(A_{kl})$ .
3. Die „geglättete Information“  $w_S(\hat{t}^*) = -\log \sum_{k,l} N(\alpha(k, l, \hat{t}^*); 0, \gamma) A_{kl}$ . Dabei bezeichnet  $N(\alpha(k, l, \hat{t}^*); 0, \gamma)$  die mittelwertfreie Normalverteilung mit Standardabweichung  $\gamma$ , wobei  $\alpha(k, l, \hat{t}^*)$  der Winkel zwischen der Translationsrichtung, die durch  $(k, l)$  repräsentiert wird, und der Schätzung  $\hat{t}^*$  ist. Die Summe bewirkt also eine räumliche Glättung von  $A$ , ähnlich einer Faltung mit einem Gaußkern.

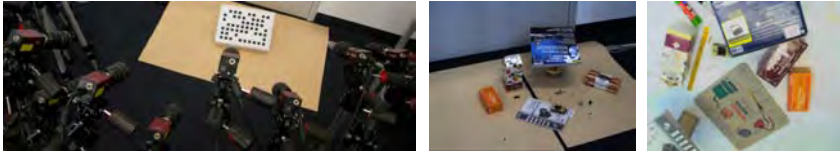


Abb. 1: Aufbau der Experimente, von links nach rechts: Multikamerasystem mit Muster für die Zhang-Kalibrierung, Szene für die Selbstkalibrierung, Szene im ersten Roboterarmexperiment.

### 2.3 Optimierungskriterium für die Auswahl relativer Posen

Um bezüglich einer Referenzkamera  $i$  die Pose einer Kamera  $j$  zu bestimmen, wird ein *Dreieckspfad* von  $i$  nach  $j$  in  $G_R$  benötigt, wobei  $i$  im ersten Dreieck und  $j$  im letzten Dreieck enthalten sein muss. Die Auswahl des Dreieckspfades erfolgt so, dass die Gesamtunsicherheit aller enthaltenen relativen Posen minimiert wird. Nimmt man Unabhängigkeit zwischen den einzelnen relativen Posen an, so erhält man unabhängig von der Wahl des Unsicherheitsmaßes den Ausdruck  $w(P) = \sum_{i^* \in P} w(i^*)$  für die Gesamtunsicherheit eines Dreieckspfades  $P$  (BAJRAMOVIC & DENZLER, 2008B). Aufgrund der Summe kann man einen Dreieckspfad mit *minimaler* Gesamtunsicherheit auch als *kürzesten* Dreieckspfad auffassen. Für die Gesamtkalibrierung werden kürzeste Dreieckspfade von einem *Referenzkamerapaar* zu allen anderen Kameras berechnet, wobei das Referenzpaar so bestimmt wird, dass die Gesamtunsicherheit aller verwendeten relativen Posen minimal ist. Details können der Literatur (BAJRAMOVIC & DENZLER, 2008A, BAJRAMOVIC & DENZLER, 2008B) entnommen werden.

## 3 Experimente

Es werden Experimente auf drei verschiedenen Szenen durchgeführt. Der erste Aufbau („Multikamera“) besteht aus acht Kameras (zwei AVT Marlin und sechs AVT Pike Kameras) wie in Abb. 1 dargestellt. Bei den anderen beiden Aufbauten („Roboterarm 1“ und „Roboterarm 2“) wurde ein Roboterarm verwendet, um mit einer Sony DWL-VL500 Kamera von 14 bzw. 10 verschiedenen Positionen aus Bilder aufzunehmen. In diesen beiden Versuchen wurden sehr ähnliche Szenen verwendet. Die Erste ist in Abb. 1 rechts dargestellt. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass im letzten Experiment *nicht* alle Bildpaare einen überlappenden Sichtbereich besitzen, was eine zusätzliche Schwierigkeit darstellt.

Als Voraussetzung für eine quantitative Auswertung werden Ground Truth Daten benötigt. Im ersten Aufbau werden diese gewonnen, indem vor dem eigentlichen Experiment ein Kalibrieremuster in die Szene gelegt wird (siehe Abb. 1 links) und mittels (ZHANG, 2000) eine Kalibrierung durchgeführt wird. Diese wird natürlich nur eine bedingte Genauigkeit aufweisen, reicht aber für einen Vergleich aus. Bei den anderen beiden Aufbauten werden verlässliche metrische Ground Truth Daten direkt von der Steuereinheit des Roboterarms geliefert.

Um die Unsicherheitsmaße zu bewerten, wird die Korrelation mit dem Fehler in der geschätzten relativen Pose berechnet. Als Fehlermaß wird dabei aufgrund der unbekannten Skalierungen der Winkel zwischen korrektem und geschätztem Translationsvektor in Grad verwendet. Da zudem

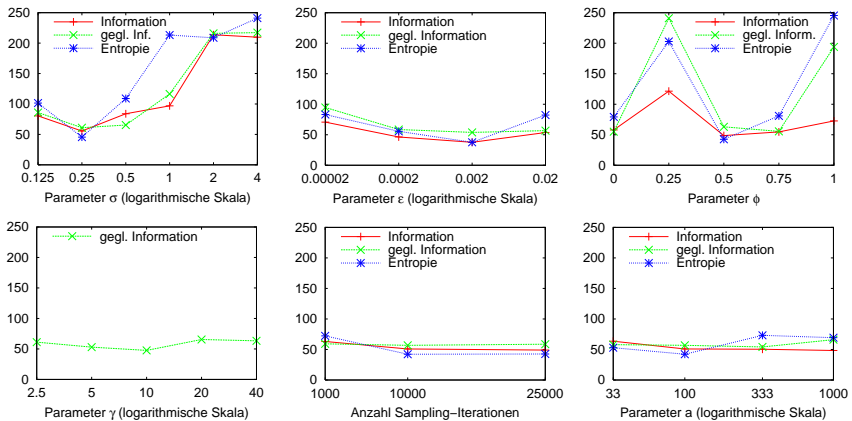


Abb. 2: Einfluss verschiedener Parameter auf den Median der Mediane der Fehler in den Kamerapositionen für den Aufbau Roboterarm 2 in Millimetern.

das Vorzeichen unbekannt ist, beträgt dieser Winkel maximal 90 Grad. Um den Fehler in der Gesamtkalibrierung zu ermitteln, muss zunächst die geschätzte Kalibrierung mit den Ground Truth Daten registriert werden, um die grundsätzlich unbestimmte Ähnlichkeitstransformation herauszurechnen. Hierfür wird randomisiert der kleinste Median der Fehlerquadrate in den Kamerapositionen bestimmt auf Basis eines nicht-linearen Registrierungsalgorithmus mit linearer Initialisierung. Der resultierende kleinste Median – in Millimetern – wird schließlich als Fehlermaß für die Kalibrierung verwendet.

Da das Schätzen der relativen Pose und die Auswertung der Unsicherheitsmaße randomisiert erfolgen, werden alle Experimente 20mal wiederholt. Es wird entweder der Median dieser 20 Wiederholungen für die weitere Auswertung verwendet oder die gesamte Verteilung in Form eines Boxplots (TUKEY, 1977) dargestellt. Eine Erklärung der Boxplots ist in Abb. 3 zu finden.

### 3.1 Analyse der Parameter

Zunächst werden günstige Werte für die verschiedenen Parameter der Unsicherheitsmaße und des zugehörigen Algorithmus ermittelt. Hierbei wird der Fehler bei der Gesamtkalibrierung betrachtet, wobei hier aus Platzgründen nur Ergebnisse für den Aufbau Roboterarm 2 in Abb. 2 präsentiert werden. Die beiden anderen Aufbauten liefern keine wesentlich abweichenden Werte für die optimale Wahl der Parameter.

Die Parameter  $\sigma$  und  $\phi$  der Verteilung in Gleichung (1) haben einen deutlichen Einfluss auf die Gesamtergebnisse. Der Einfluss der übrigen Parameter ist hingegen relativ unbedeutend, sodass sie beinahe beliebig gewählt werden können. Es werden folgende Werte in allen Experimenten verwendet:  $\sigma = 0,25$ ,  $\delta = 0,002$ ,  $\phi = 0,5$ ,  $\gamma = 5$ ,  $a = 100$ , 10000 Sampling-Iterationen.



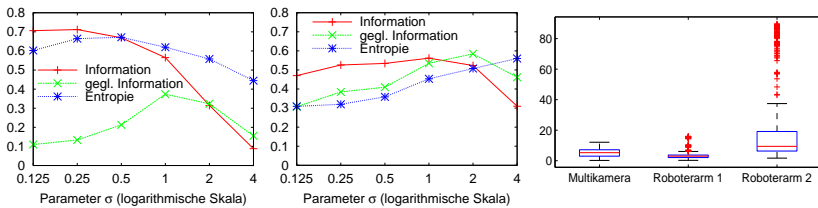


Abb. 3: Links: Pearson-Korrelation zwischen den drei Unsicherheitsmaßen und dem Translationsfehler der geschätzten relativen Posen für verschiedene Werte des Parameters  $\sigma$ , kombiniert ausgewertet über allen drei Experimenten. Mitte: entsprechende Spearman-Korrelation. Rechts: Translationsfehler in Grad als Boxplot, getrennt für die drei Experimente. Ein Boxplot (TUKEY, 1977) enthält einen Kasten, der die Quartile angibt, wobei der Median durch die Linie im Kasten dargestellt wird. Die Verteilung außerhalb der Quartile wird bis zur 1,5-fachen Ausdehnung zwischen den Quartilen durch Linien angedeutet. Ausreißer darüber hinaus werden durch einzelne Kreuze dargestellt.

### 3.2 Korrelation der Unsicherheitsmaße mit dem Translationsfehler

Um die Unsicherheitsmaße unabhängig von der Gesamtkalibrierung zu beurteilen, wird für jedes der drei Maße die Pearson-Korrelation mit dem Translationsfehler der geschätzten relativen Posen berechnet. Als Datengrundlage dienen dabei alle geschätzten relativen Posen in allen drei Experimenten über die 20 Wiederholungen. Da der Parameter  $\sigma$  einen ausgeprägten Einfluss auf die Ergebnisse der Gesamtkalibrierung hat, werden die Korrelationen exemplarisch für verschiedene Werte von  $\sigma$  angegeben. Die Ergebnisse sind in Abb. 3 links dargestellt. Es zeigt sich, dass die Maße Information und die Entropie eine hohe Korrelation mit dem Translationsfehler aufweisen. Beim Maß geglättete Information ist die Korrelation mit dem Translationsfehler gering. Die Gesamtergebnisse sind hingegen vergleichbar mit den anderen beiden Maßen (siehe Abb. 4). Da die Pearson-Korrelation nur den *linearen* Zusammenhang zwischen zwei Zufallsgrößen erfasst, ist in Abb. 3 Mitte zusätzlich die Rang-basierte Spearman-Korrelation angegeben. Dort ist kein derart massiver Unterschied zu beobachten.

### 3.3 Vergleich mit zufälliger Auswahl und Breitensuche

In Abb. 4 werden die Ergebnisse der Gesamtkalibrierung bei Verwendung eines der drei Unsicherheitsmaße mit zufälligen Kantengewichten und der naiven Auswahl mittels Breitensuche (BFS) verglichen. Bei allen drei Aufbauten sind (im Median) alle Unsicherheitsmaße besser als Breitensuche. Zufall kann vereinzelt zwar bessere Ergebnisse liefern, streut aber sehr stark und ist im Median beim ersten und dritten Aufbau das schlechteste Verfahren. Beim Aufbau Roboterarm 1 hingegen wird Zufall selbst im Median nur vom Entropiemaß übertroffen. Diese guten Ergebnisse mit zufälligen Gewichten lassen sich durch die geringe Streuung der Fehler in den relativen Posen (Abb. 3 rechts) erklären.

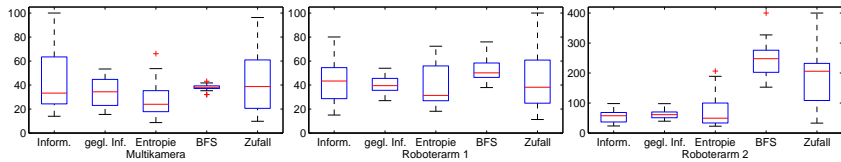


Abb. 4: Vergleich der Gesamtkalibrierung (Median des Medians der Fehler in den Kamerapositionen in Millimetern) bei Verwendung der verschiedenen Unsicherheitsmaße, bei naiver Auswahl (Breitensuche BFS) und zufälligen Kantengewichten. Für die Darstellung wurden die Werte auf 100 bzw. 400 beschränkt. (Boxplots werden in Abb. 3 erläutert.)

Beim Aufbau Roboterarm 2 fällt der Gewinn durch die drei Unsicherheitsmaße besonders groß aus und beträgt im Median bis zu Faktor vier. Dies kann dadurch erklärt werden, dass im dritten Experiment nicht alle Kamera-paare eine gemeinsame Ansicht haben, was zu deutlich höheren maximalen Fehlern in den geschätzten relativen Posen führt, wie in Abb. 3 rechts zu erkennen ist. Solche Fälle werden von Breitensuche und Zufall nicht erkannt, sodass Kamera-paare mit völlig falscher relativer Pose in die Gesamtergebnisse eingehen.

## 4 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Verfahren zur Kalibrierung eines Multikamerasystems mittels relativer Posen und deren Unsicherheiten vorgestellt, die mittels eines von drei Maßen ermittelt wurden. Mittels dreier unterschiedlicher experimenteller Aufbauten wurden das Gesamtverfahren und die Unsicherheitsmaße näher untersucht. Zunächst wurden günstige Werte für sechs Parameter der Algorithmen bestimmt. Anschließend wurde die Korrelation zwischen den Unsicherheitsmaßen und dem Fehler in den geschätzten relativen Posen bestimmt. Die Maße Information und Entropie zeigten eine hohe Korrelation, wohingegen das Maß geglättete Information nur eine geringe Korrelation aufwies. Trotz dieses Unterschieds zeigte das Kalibrierverfahren mit jedem der drei Maße relativ ähnliche Ergebnisse bei der Gesamtkalibrierung. Im Vergleich zu Breitensuche und zufälligen Kantengewichten erreichte vor allem das Entropiemaß eine deutliche Verbesserung. Beim Aufbau ohne gemeinsamen Sichtbereich für alle Kamera-paare fiel diese Verbesserung besonders groß aus: im Median etwa Faktor vier.

## 5 Literaturverzeichnis

- BAJRAMOVIC, F. & DENZLER, J., 2008a: An Efficient Shortest Triangle Paths Algorithm for Uncertainty-based Multi Camera Calibration. Proceedings of the Workshop on Omnidirectional Vision (OMNIVIS).
- BAJRAMOVIC, F. & DENZLER, J., 2008b: Global Uncertainty-based Selection of Relative Poses for Multi Camera Calibration. Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC), Band 2, S. 745–754.
- BAKER, P. & ALOIMONOS, Y., 2000: Complete Calibration of a Multi-camera Network. Proc. of the Workshop on Omnidirectional Vision (OMNIVIS), S. 134–144.

- BARRETO, J. P. & DANIILIDIS, K., 2004: Wide Area Multiple Camera Calibration and Estimation of Radial Distortion. Proceedings of the Workshop on Omnidirectional Vision (OMNIVIS).
- BRÜCKNER, M.; BAJRAMOVIC, F. & DENZLER, J., 2008 (January): Experimental Evaluation of Relative Pose Estimation Algorithms. VISAPP 2008 Proc. of the Third Int. Conference on Computer Vision Theory and Applications, Band 2, S. 431–438.
- CHEN, X.; DAVIS, J. & SLUSALLEK, P., 2000: Wide Area Camera Calibration Using Virtual Calibration Objects. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Band 2, S. 2520–2527.
- ENGELS, C. & NISTÉR, D., 2005: Global Uncertainty in Epipolar Geometry via Fully and Partially Data-driven Sampling. ISPRS Workshop BenCOS Towards Benchmarking Automated Calibration, Orientation and Surface Reconstruction from Images, S. 17–22.
- FISCHLER, M. A. & BOLLES, R. C., 1981: Random sample consensus a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Communications of the ACM, **24**(6), S. 381–395.
- HARTLEY, R. & ZISSERMAN, A., 2003: Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, Band 2.
- KITAHARA, I.; SAITO, H.; AKIMICHI, S.; ONO, T.; OHTA, Y. & KANADE, T., 2001: Large-scale Virtualized Reality. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Technical Sketches.
- MANTZEL, W. E.; CHOI, H. & BARANIUK, R. G., 2004: Distributed Camera Network Localization. Proceedings of the 38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Band 2, S. 1381–1386.
- MARTINEC, D. & PAJDLA, T., 2006: 3D Reconstruction by Gluing Pair-Wise Euclidean Reconstructions, or "How to Achieve a Good Reconstruction from Bad Images". 3DPVT '06 Proceedings of the Third International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission (3DPVT'06), S. 25–32.
- MARTINEC, D. & PAJDLA, T., 2007: Robust Rotation and Translation Estimation in Multiview Reconstruction. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), S. 1–8.
- STEWÉNIUS, H.; ENGELS, C. & NISTÉR, D., 2006: Recent Developments on Direct Relative Orientation. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, **60**(4), S. 284–294.
- SVOBODA, T.; MARTINEC, D. & PAJDLA, T., 2005: A Convenient Multi-Camera Self-Calibration for Virtual Environments. PRESENCE Teleoperators and Virtual Environments, **14**(4), S. 407–422.
- TORR, P.H.S. & ZISSERMAN, A., 2000: MLESAC A New Robust Estimator with Application to Estimating Image Geometry. Comp. Vision and Image Understanding, **78**(19), S. 138–156.
- TUKEY, J. W., 1977: Exploratory Data Analysis. Reading, MA: Addison-Wesley.
- VERGÉS-LLAHÍ, J.; MOLDOVAN, D. & WADA, T., 2008: A New Reliability Measure for Essential Matrices Suitable in Multiple View Calibration. VISAPP 2008 Proceedings of the Third International Conference on Computer Vision Theory and Applications, Band 1, S. 114–121.
- ZHANG, Z., 2000: A Flexible New Technique for Camera Calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **22**(11), S. 1330–1334.

## Ansätze zur geometrischen und semantischen Modellierung von großen, unstrukturierten 3D-Punktmengen

FRANK BOOCHS, FREDIE KERN, RAINER SCHÜTZE & ANDREAS MARBS<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Der zunehmende Einsatz des terrestrischen 3D-Laserscannings (TLS) für die Bereiche Bauwesen, Architektur und Archäologie liefert immer umfangreichere TLS-Punktmengen in immer kürzerer Messzeit vor Ort. Auf der Auswerteseite erfordern diese per se unstrukturierten Datenmengen in zunehmendem Maße Softwaremodule, die ebenso eine zügige und bequeme, somit auch effiziente, Verarbeitung erlauben. In diesem Artikel werden verschiedene Konzepte und Ansätze zur Konstruktion von halb- und vollautomatisierten Auswertelgorithmen für 3D-Punktmengen vorgestellt. Dabei werden die zu bewältigenden Aufgabenstellungen, wie z.B. Kugel- und Gebäuderekonstruktion, auf spezielle exakt formulierte Detailprobleme begrenzt, so dass das Ziel eines automatisierten Auswertungsprozesses auch in der Praxis erreicht wird. Die Algorithmen arbeiten entweder auf rein geometrischer Basis oder unter Zuhilfenahme von Vorwissen in Form einer Ontologie. Die Bearbeitungsprozesse sind sowohl daten- als auch modellgetrieben. Die Anwendungsbeispiele beschäftigen sich u.a. mit der Passkugelextraktion, der Querprofilableitung bei Schienenverkehrsanlagen und der Modellierung von Gebäudeinnenräumen. Teilweise lassen sich die dargestellten Lösungen durch einfache Variation der Eingangsparameter auf vergleichbare Anwendungsbereiche übertragen.*

*Summary: There is an increasing interest to work with terrestrial laser scanner (TLS) for applications in fields like civil engineering, architecture and archaeology surveys. Capturing millions of points from any surface is simply done within a couple of minutes, whereas a subsequent modelling of such unstructured cloud of points is a demanding task needing powerful software tools, allowing a fast processing and easy handling in order to provide an efficient work flow. This survey presents different concepts and approaches for semi and fully automatic algorithms for segmentation and modelling of 3D data. The tasks to be executed, i.e. reconstruction of spheres or extraction of building elements, are simplified in an adopted manner, allowing to achieve an automatical processing under practical conditions. The algorithms described in this paper work either on a geometrical base or in combination with knowledge introduced by an ontology. Some algorithms are working more data-driven other ones more model-driven. The examples show the extraction of spheres for georeferencing, the analysis of vertical cross sections from track facilities and the modelling of building elements. The solutions shown can be transferred to other similar applications with slight modification of some input parameters.*

Der vollständige Artikel ist erschienen in:

**Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformatik, Jahrgang 2009, Heft 1, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart**

<sup>1)</sup> Frank, Boochs, Fredie Kern, Rainer Schütze, Andreas Marbs, i3mainz –Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik, Fachhochschule Mainz, Holzstr. 36, D-55116 Mainz, e-mail: {boochs, kern, schuetze, [marbs@geoinform.fh-mainz.de](mailto:marbs@geoinform.fh-mainz.de)}



# Mustererkennung in der Fernerkundung

WOLFGANG FÖRSTNER<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Der Beitrag beleuchtet die Forschung in Photogrammetrie und Fernerkundung unter dem Blickwinkel der Methoden, die für die Lösung der zentrale Aufgabe beider Fachgebiete, der Bildinterpretation, erforderlich sind, sowohl zur Integration beider Gebiete, wie zu einer effizienten Gestaltung gemeinsamerer Forschung. Ingredienzien für erfolgreiche Forschung in diesem Bereich sind Fokussierung auf Themen, die in ca. eine Dekade bearbeitet werden können, enge Kooperation mit den fachlich angrenzenden Disziplinen – der Mustererkennung und dem maschinellen Lernen – , kompetitives Benchmarking, Softwareaustausch und Integration der Forschungsthemen in die Ausbildung. Der Beitrag skizziert ein Forschungsprogramm mit den Themen ‚Mustererkennung in der Fernerkundung‘ und ‚Interpretation von LIDAR-Daten‘ das, interdisziplinär ausgerichtet, die Photogrammetrie mit den unmittelbaren Nachbardisziplinen zunehmend verweben könnte, und – nach Ansicht des Autors – zur Erhaltung der Innovationskraft auch dringend erforderlich ist.*

## 1 Einleitung

Die methodischen Probleme in Photogrammetrie und Fernerkundung überlappen zunehmend untereinander und mit denen der benachbarten Fachgebiete, wie der Mustererkennung, des Maschinellen Lernens und der Computer Vision.

Zwei Gründe sind m. E. dafür ausschlaggebend: (1) Die räumliche Auflösung von Satellitenbilddaten reicht in den Bereich hochfliegender photogrammetrischer Kameras. Die in jüngster Zeit verfügbaren spektral hochauflösenden und oft flugzeuggetragen, oder auch terrestrisch eingesetzten Sensoren verstärken diesen Trend. Daher spielt neben der Physik die Geometrie der zu erfassenden Objekte bei der Interpretation eine zunehmende Rolle. (2) Im Bereich der Bildinterpretation, initiiert durch die Forschung im Bereich der Mustererkennung und des Computer Vision, setzen sich zunehmend statistische Verfahren durch, insbesondere sog. Graphische Modelle, mit Markoff-Feldern und Bayes-Netzen in allen Variationen und Spezialfällen. Dazu kommt die rasante Entwicklung im Bereich des maschinellen Lernens, die diesen Verfahren erst zu ihrem Erfolg verhilft. Damit steht, gegenüber den wissensbasierten Verfahren der 90-er Jahre, ein theoretisch fundiertes und noch lange nicht ausgeritztes Arsenal an Methoden zur Verfügung.

Dem gegenüber stehen zwei Beobachtungen, die m. E. eine Diskussion über das Forschungsprogramm in Photogrammetrie und Fernerkundung erfordern:

- Die Forschung in der Fernerkundung wird geprägt durch geowissenschaftliche Anwendungen. Dabei spielen zwar Fernerkundungsdaten eine tragende Rolle, jedoch stehen meist die Modelle für die Geo-Prozesse und nicht die Modelle für die Abbildung in Fernerkundungsdaten noch die Modelle für die Interpretation im Fokus des Interesses. Man verwendet oft die Mustererkennungsverfahren, die in den Fernerkundungssystemen angeboten werden, die kaum oder – aus kommerziellen Gründen – nicht dokumentiert sind.
- Die photogrammetrische Forschung fokussierte sich, was Fernerkundungsdaten angeht, bisher auf die Georeferenzierung, und, was die Interpretation von Luftbildern angeht, auf Gebäude und Straßen, weniger auf Vegetation oder gar andere den Geo-

1) Wolfgang Förstner, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Institut für Geodäsie und Geo-information, Professur für Photogrammetrie, Nußallee 15, 53115 Bonn; E-Mail: wf@ipb.uni-bonn.de

wissenschaften wesentliche Objekte. Daher spielte die Geometrie bei den in der Photogrammetrie entwickelten Methoden für die Bildinterpretation eine dominante Rolle, nicht die statistischen Verfahren, auch wenn diese Verfahren in jüngster Zeit öfters eingesetzt werden.

Eine systematische Aufbereitung der Klassifikations- und Interpretationsmethoden aus Mustererkennung, Maschinellem Lernen und Computer Vision für die Bildinterpretation in Photogrammetrie und Fernerkundung ist daher m. E. dringend erforderlich. Dies betrifft nicht zuletzt die quantitative Beurteilung der in den kommerziellen Fernerkundungssystemen und an den Forschungsgruppen der Hochschulen verfügbaren Methoden an Hand von empirischen Untersuchung von Fernerkundungsdaten mit Referenzdaten und der darauf aufbauenden Weiterentwicklung und Neukonzeption von Methoden und Verfahren.

Der Beitrag stellt diese Situation dar und skizziert ein Forschungsprogramm, das das ingenieurtechnische Know-how in der Photogrammetrie und seinen technisch orientierten Nachbargebieten integriert und für den Bereich der Bildinterpretation in der Fernerkundung, die Photogrammetrie einschließend, nutzbar machen kann. Innerhalb der ISPRS Arbeitsgruppe „Pattern Recognition in Remote Sensing“ die mit der Internationalen Assoziation für Mustererkennung kooperiert, soll diese Arbeit eine internationale Plattform erhalten.

Die folgende Darstellung ist sicher an verschiedenen Stellen subjektiv, und im Bereich der Fernerkundung ergänzungs- oder korrekturbedürftiger als in der Photogrammetrie. Dies hat möglicherweise Auswirkungen auf die Konsequenzen. Daher kann der Leser den Beitrag als Anstoß nehmen, seine eigenen Gedanken den hier geäußerten gegenüberzustellen. Dennoch kann das skizzierte Forschungsprogramm als Grundlage für eine Diskussion über künftige integrierte Projekte dienen.

## 2 Photogrammetrie und Fernerkundung

### 2.1 Entwicklung

Während sich die Photogrammetrie als Ingenieurdisziplin bis in das 19. Jahrhundert zurückverfolgen lässt, begann die Entwicklung der Fernerkundung erst mit dem Aufkommen der ersten Satelliten in den 70er Jahren.

Auch wenn die damals hochmodernen Möglichkeiten der Erkundung aus dem Weltall von photogrammetrischen Instituten aufgegriffen wurden, vor allem, um das brennende Problem der topographischen Kartierung besser anzugehen, entwickelte sich die *Fernerkundung* fast unabhängig. Den Geowissenschaften standen zum ersten Mal überregionale Beobachtungsplattformen zur Verfügung. Die mit den digitalen Bildern verbundene Möglichkeit Auswerteprozesse zu automatisieren konzentrierten sich auf die für die Interpretation erforderlichen atmosphärischen Korrekturen und die Georeferenzierung und vor allem in Softwarepaketen verfügbare Ansätze zur Klassifikation.

Erst mit dem empirischen und theoretischen Nachweis der hochgenauen automatischen Punktübertragung in digitalen Bildern Anfang der 80er Jahre begann die Digitale Bildverarbeitung ihren Einzug in die *Photogrammetrie*. Heute sind alle klassischen photogrammetrischen Prozesse, die Herstellung von Orthophotos, die Herstellung von digitalen Höhenmodellen, die Orientierungsbestimmung mit Hilfe der Bündeltriangulation, ausgehend von den digitalen Bildern weitgehend automatisiert, selbst im Nahbereich, der sich lange einer Standardisierung entzog. Dagegen halten die Anfang der 90er eingeleiteten Forschungsanstrengungen zur Erfassung des semantischen Gehalts von Bildern und Karten bis heute an, erweisen sich

als außerordentlich schwierig und haben lediglich, was die geometrische Erfassung von 3D-Objekten angeht, etwa von Stadtmodellen, zu praktischem Erfolg geführt.

## 2.2 Situation

Sowohl in Fernerkundung wie Photogrammetrie werden immer schon die neuesten Verfahren der Mustererkennung und seit Kurzem des Maschinellen Lernens aufgegriffen, jedoch

- vereinzelt, nicht koordiniert, nicht fokussiert,
- sehr heterogen, breit gestreut, und - soweit beurteilbar -
- weitgehend ohne spürbaren Einfluss auf die Ausbildung.

Folgende Gründe sind m. E. für diese Situation ausschlaggebend:

1. Fernerkundung und – in etwas geringerem Maße – Photogrammetrie sind außerordentlich breit angelegt. Sie sind anwendungs- oder problemlösungs- nicht methodisch orientiert, eine Situation, um die uns die Nachbardisziplinen beneiden. Methoden werden nach ihrer Eignung für die anstehende Frage-/Problemstellung ausgewählt. Dies prägt auch wesentlich die Curricula der Ausbildung an den Hochschulen.

Im Gegensatz zu der sehr konzentrierten und erfolgreichen methodischen Entwicklung der Aerotriangulation in den 70er und 80er Jahren fehlt heute ein Fokus. Die sehr beachtlichen Erfolge in der photogrammetrischen Forschung in den 90er Jahren im Bereich der sog. semantischen Modellierung (s. FÖRSTNER 1999), gehen einher mit einer Diversität der betrachteten Fragestellungen und Methoden. Allerdings werden die damals begonnenen Versuche die begriffliche Modellierung in die Interpretation einzubringen heute kaum mehr weitergeführt, obwohl gerade die graphischen Modelle dazu angetan wären.

In der Fernerkundung ist die methodische Entwicklung, was die Mustererkennung nicht die Anwendungen angeht, einerseits ganz deutlich von der Verfügbarkeit von Klassifikations- und Interpretationsalgorithmen in den Softwaresystemen geprägt und leidet z. T. unter der Geheimhaltung der Algorithmen durch die Firmen, da eine Beurteilung der implementierten Verfahren so verhindert wird. Andererseits werden die in der Mustererkennung und dem Maschinellen Lernen entwickelten Algorithmen mit großem Interesse aufgenommen, jedoch i. a. ohne eine vergleichende Evaluierung der Verfahren, die die Randbedingungen ihrer Eignung abstecken.

2. Die Gruppe der Wissenschaftler in der Photogrammetrie ist - mit der Breite verglichen - verhältnismäßig klein. Symposia der ISPRS-Kommission III konnten in den letzten Jahren mit etwas über 100 eingereichten Beiträgen rechnen. Die Vielzahl der der Workshops ähnlicher Größe integrieren sinnvollerweise mehrere Arbeitsgruppen, allerdings um den Preis der Verbreiterung der Themen.

Diese Situation ist den jährlich mehreren 1000 eingereichten Beiträge in den Bereichen Computer Vision, Mustererkennung und Maschinelles Lernen gegenüberzustellen, ein Faktor von mindest 20. Auch wenn nicht alle Entwicklungen in diesen methodisch orientierten Nachbarbereichen unmittelbar auf die Bildinterpretation übertragbar sind, so gibt es in diesen Bereichen methodische Themen die en vogue sind und die von einer vergleichsweise großen Zahl von Wissenschaftlern über mehrere Jahre bearbeitet werden und damit zu einer gewissen Klärung geführt werden.

3. Das vor uns liegende Problem der Interpretation flächenhafter Daten ist aus verschiedenen Gründen außerordentlich schwierig. Dies hat zu mehreren Konsequenzen geführt:



- a. Semi-automatische Verfahren, bei denen ein Operateur die schwierigen Teile der Interpretation übernimmt, als gleitender Übergang zu vollautomatische Verfahren werden zu Recht avisiert und zeigen Erfolge. Der Zwang zum Erfolg wird aber oft mit pragmatischen Lösungen, die nur eine beschränkte Theoriebildung zulassen, erkaufte.
- b. Erfolg bei der Bildinterpretation stellt sich nur zögernd ein. Etwa wurde das in den 90er-Jahren mit großem Enthusiasmus angegangene Problem der hochaufgelösten Gebäuderekonstruktion bis heute nicht wirklich gelöst. Die verfügbaren 2 ¾ -D-Lösungen aus hochgradig überlappten Stereoaufnahmen oder aus LIDAR-Daten sind weder so hoch aufgelöst noch interpretiert, wie seinerzeit angestrebt.
- c. Ernüchterung über die Schwierigkeit des Problems der Bildinterpretation führten teilweise zu einem Rückzug auf Probleme, bei denen die ‚Trauben nicht so hoch hängen‘, ohne jedoch die Methoden, die die Interpretation erforderlich sind, aus dem Auge zu verlieren. Die Folge ist jedoch eine Defokussierung und Individualisierung, die eine nachhaltige wissenschaftliche Entwicklung verhindert.

Die Situation erscheint schwieriger als vor ca. 15 Jahren zu Beginn des Projektes ‚Semantische Modellierung‘ (FÖRSTNER 1999), da das Bewusstsein und die Ansprüche gewachsen sind und der Abstand zu einer Lösung des Interpretationsproblems weiter erscheint als seinerzeit, um Motivation für einen neuen Anlauf aufzubauen. Tatsächlich sind aber die Indizien nur sichtbar, weil sich der Blick geschärft hat. Tatsächlich liegt ein reichhaltiger Erfahrungsschatz und Detailwissen vor, der nahrhafter Boden für eine fruchtbare Entwicklung bilden kann, die z. B. so aussehen kann, wie im Folgenden skizziert.

### 3 Ein Forschungsprogramm

Zunächst möchte ich Ingredienzien nennen, die nach den Erfahrungen der Vergangenheit eine nachhaltige und weit reichende Entwicklung ermöglichen, um dann einige Themen unter dem Oberthema ‚Bildinterpretation‘ anzusprechen, die sich für eine Fokussierung der Forschung in Photogrammetrie und Fernerkundung eignen.

#### 3.1 Ingredienzien

Folgende Randbedingungen fördern erfahrungsgemäß die nachhaltigen und weit reichenden Erfolge in der wissenschaftlichen Entwicklung:

- Fokussierung auf Themen, die in ca. eine Dekade bearbeitet werden können,
- Enge Kooperation mit den fachlich angrenzenden Disziplinen,
- Kompetitives Benchmarking,
- Softwareaustausch und
- Integration in die Ausbildung.

**Themen:** Die Zukunft der Forschung in der Photogrammetrie liegt in der Bildinterpretation, wobei Intensitäts- und Entfernungsbilder gemeint sind. Themen für ein Forschungsprogramm sollten fokussiert genug sein, um in überschaubarer Zeit – vier bis fünf Doktorandengenerationen – zu einem Abschluss kommen zu können, andererseits anspruchsvoll genug sein, um die besten Köpfe unter unseren Studierenden zur Mitarbeit zu motivieren, ähnlich wie es das Förderinstrument des Sonderforschungsbereichs vorsieht, jedoch ohne die dort erforderlichen Randbedingungen. Nachhaltigkeit ist nur mit methodisch orientierten Themen erzielbar, da-

zu zählen Theoriebildung, die Entwicklung theoretisch fundierter Verfahren und der Nachweis ihrer Leistungsfähigkeit (s. u.).

**Kooperationen:** Die in den Nachbardisziplinen, vor allem der Mustererkennung, dem maschinellen Lernen und derzeit auch dem Computer Vision behandelten Themen sind zu einem großen Teil, evtl. nach geeigneter Anpassung, für die Bildinterpretation nutzbar. Die theoretischen Konzepte, insbesondere im Bereich der Statistik, sind einerseits konzeptionell sehr weit entwickelt, sind wegen der Komplexität und der Breite der dort behandelten Anwendungsprobleme (Bildfolgen, Bildsuche, 2D- und 3D-Dateinterpretation) Gegenstand aktueller Forschung. Wir müssen, da wir als Gruppe selbst zu klein sind, das dort vorhandene konzeptionelle Know-how und die Erfahrungen bei der Modellierung in unsere eigenen Arbeiten integrieren, was m. E. nur durch gemeinsame Projekte gelingen kann, die am gleichen Teilproblem festgemacht sind.

**Benchmarking:** Zentral für die Erfolge, schon im Bereich der Geometrie-Probleme und des Stereoproblems in den 90ern, erst recht im Bereich der Objekterkennung seit etwa 2000, sind Benchmarks. Nicht zuletzt waren auch die Großversuche ‚Oberschwaben‘ und ‚Appenweier‘ die Basis für die schwer nachzuahmenden Erfolge in der Aerotriangulation. Benchmarks motivieren Autoren neuer Algorithmen und Verfahren sich einer anerkannten Evaluation zu stellen und im Ranking nach oben zu kommen. Benchmarks objektivieren und triggern die wissenschaftlichen Entwicklungen. Die heutigen Möglichkeiten, solche vergleichenden Evaluierungen über das Internet zu realisieren, vereinfachen und beschleunigen die Teilnahme an Benchmarks.

**Softwareaustausch:** Offener Softwareaustausch ist vertrauensbildend, vergrößert die Zitierrate, und erleichtert die eigene Arbeit, da man auf die geprüfte Erfahrung anderer zurückgreifen kann. Die großen Anstrengungen Anfang der 90er Jahre, große Softwarepakete für den Bereich Computer Vision zu entwickeln (etwa RADIUS oder TargetJr) scheiterten am Anspruch und werden heute durch die Bereitstellung einzelner, wohl definierter Teilmodule ersetzt. Die an deutschen Photogrammetrie-Instituten vorhandene Vorsicht bzgl. der Weitergabe von Software, die bis zu einer grundsätzlichen Ablehnung der Abgabe eigener Software geht – man könnte damit ja eine Verdienstmöglichkeit vergeben –, hat sicher viele gute Entwicklungen und auch Kooperationen verhindert – und hat m. E. von daher der nachhaltigen wissenschaftlichen Entwicklung nicht gedient.

**Ausbildung:** Die Methodik der Bildinterpretation, einerseits in den statistischen Grundlagen, andererseits in der begrifflichen Durchdringung der Verfahren, hat sich in den letzten 10 Jahren grundlegend weiterentwickelt. Grundlegende Konzepte, etwa der statistischen Modellierung mit graphischen Modellen, der Hauptkomponenten- und der Diskriminanzanalyse und der logistischen Regression zur Behandlung von Mischverteilungen, aber auch die eher logischen oder algebraischen Verfahren wie Entscheidungsbäume oder Support-Vektor-Maschinen sollten m. E. schon im Bachelor vermittelt werden, möglicherweise in Arbeitsteilung mit der Grundausbildung in Statistik. Das mathematische Werkzeug dafür ist ab dem 3. Bachelorsemester vorhanden, die begrifflichen Grundlagen der Semantik der Bildinterpretation im Bereich Geoinformation gelegt. Bachelorarbeiten sollten m. E. bereits im Bereich Bildinterpretation angesiedelt werden können, und damit das Interesse an dem mathematisch der physikalischen Geodäsie in Nichts nachstehenden Methoden wecken.

### 3.2 Themen

Die beiden im Folgenden aufgefächerten Themenbereiche eint die Notwendigkeit die neuesten Werkzeuge für die Modellierung und Konzepte für die Dateninterpretation aufzubereiten.

Die in beiden Fällen erforderlichen Vorverarbeitungsschritte, angefangen bei der Kalibrierung, über die Georeferenzierung bis zur geometrisch/radiometrischen Datenfusion sind nicht im Fokus. Denn an diesen Arbeiten ist ohnehin genug Interesse, sie sind Voraussetzung für die Interpretationsaufgaben, die grundsätzliche Methodik zur Lösung der Probleme ist vorhanden, die Lösung diese Probleme macht natürlich Mühe, aber wegen der Vielzahl der Einflüsse, vor allem der sich laufend erneuernden Hardware, haben die erzielten Ergebnisse – von immer zu erwartenden Seiteneffekten abgesehen – eine kürzere Lebensdauer.

Der eine Themenbereich, *Mustererkennung in der Fernerkundung*, zielt mehr auf eine Kooperation der Photogrammetrie mit der Fernerkundung, der andere, *Interpretation von LIDAR-Daten*, mehr auf eine Kooperation mit der Ingenieurgeodäsie. In beiden Fällen ist es erforderlich, die schon oben genannten Nachbarfächer der Mustererkennung, des Computer Vision und des Maschinellen Lernens zu integrieren.

**Mustererkennung in der Fernerkundung:** Die Methoden der Mustererkennung – dabei sind die des maschinellen Lernens eingeschlossen – sind dafür geeignet, die Forschung in Photogrammetrie und Fernerkundung zu integrieren. Dabei geht es um mehrere Aspekte:

- Die Objekterkennung sollte in gleicher Weise multi- und hyperspektralen Daten und geometrisches Wissen nutzen. Ohne die spektralen Reflektionseigenschaften der Objekte ist eine differenzierte Erkennung natürlicher Objekte und ihrer phänologischen Entwicklung unmöglich. Die Übertragung des normalisierten differenziellen Vegetationsindex (NDVI) auf andere Kanalkombination erscheint bei wenigen verfügbaren Kanälen sinnvoll, nicht falls es um die Identifikation der für die Erkennung relevanter Information in einem hoch aufgelösten Spektrum geht. Hier sind automatische Verfahren der Merkmalsselektion auf ihre Eignung hin zu untersuchen.

Genauso verhindert die Vernachlässigung der geometrischen Strukturen der Objekte die erfolgreiche Interpretation. Dies betrifft in erster Linie die Dreidimensionalität der Objekte mit den klassischen Folgen der Verdeckung, der Schattenbildung, der richtungsabhängigen Texturbildung und des Reliefversatzes. Gerade diese Effekte können wesentliche Merkmale für die Erkennung bilden, etwa über die Form, die Rauigkeit, oder gar die über eine die Beziehung der Objektteile abgeleitete Strukturbeschreibung. Die Integration radiometrischer und geometrischer Modelle steht noch am Anfang und erfordert umfangreiche theoretische und empirische Entwicklungen.

- Die Methoden der Mustererkennung sind allgemein genug, alle für die Interpretation erforderlichen Aspekte zu integrieren: *Vorinformation*, welches üblicherweise über Trainingsgebiete in eine Klassifikation eingebracht wird, kann zusätzlich über vorhandene digitale Karten und über fachspezifische Kenntnisse der Objekte gewonnen werden und mit Methoden des Maschinellen Lernens für die Interpretation, etwa Verfahren der Merkmalsselektion oder der unüberwachten Klassifikation aufbereitet werden. Vor allem *raum-zeitliche Strukturen* lassen sich über Zufallsfelder und kausale Netze repräsentieren, aus Daten lernen und zur Verbesserung der Klassifikation verwenden, was durch die zunehmende zeitliche Dichte vor allem von Fernerkundungsdaten hohe praktische Relevanz erhält. Die i. a. hierarchisch nach Spezialisierungs- und Bestandteilshierarchien gegliederten Modelle sind effizient in Bayes-Netze abbild- und lernbar. Die eher konstruktiven Anstrengungen im Bereich Semantic-Web zur Modellierung von Begriffen sollten mit den deduktiven Verfahren des Maschinellen Lernens verknüpft und auf die in unserem Bereich relevante Modellierung von Geoobjekten übertragen werden. Hier stellt sich u. a. das Problem, wie die i. a. nicht-stochastischen Spezialisierungshierarchien, die jedoch u. U. unscharfe Konzepte ent-

halten, mit der Unsicherheit der beobachteten Bestandteilsbeziehungen theoretisch klar, etwa durch eine gemischte *logisch-stochastische-unscharfe* Modellierung, integrieren lassen (s. z. B. NEUMANN et al. 2008).

- Eine Objektivierung der erzielten Ergebnisse kann man über theoretische und empirische Studien erreichen, wobei, wegen der Komplexität der adressierten Objekte, empirischen Validierungsmethoden eine besondere Rolle zukommt. Da Referenzdaten teuer sind und die Vorverarbeitung der Daten aufwändig ist, sind erhebliche Anstrengungen erforderlich, um zu signifikanten Aussagen über die Leistungsfähigkeit der Methoden zu gelangen. Umfang und Qualität von Referenzdaten erfordern wohl eine konzentrierte Aktion von Hochschulen, Firmen und Behörden. Dabei geht es sicher im ersten Schritt ‚nur‘ um Daten, bei denen die o. g. Probleme der Geometrie und der spektralen Auflösung noch nicht die zentrale Rolle spielen, um etwa die verschiedenen Verfahren etwa zur Landbedeckungsklassifikation zu vergleichen. Die ISPRS-Arbeitsgruppe ‚Pattern Recognition in Remote Sensing‘ hat genau dies zum Ziel.

**Interpretation von LIDAR-Daten:** Die Analyse von LIDAR-Daten hat in der letzten Dekade die Forschung in der Photogrammetrie geprägt. Parallel dazu hat das Interesse an der thematischen Auswertung terrestrischer Laserdaten in der Ingenieurgeodäsie dramatisch zugenommen. Obwohl erste Anstrengungen zur Interpretation etwa von Fassaden (z. B. RIPERDA & BRENNER 2007) Erfolge zeigen, sind die Verfahren zu ‚Objektbildung‘ aus Laserdaten genauso weit von einer Praxistauglichkeit entfernt wie die aus Luftbild- und Fernerkundungsdaten. Was die grundsätzlichen Fragestellungen angeht, sind sie ähnlich bei der Interpretation von Luftbildern und Fernerkundungsdaten. Im Einzelnen gibt es jedoch Unterschiede:

- Eine zuverlässige Objektbildung verlangt die gleichzeitige Nutzung von Intensitäts- bzw. Farb- und Entfernungsinformation. Intensitätsinformation steht entweder unmittelbar über das Lasersignal oder über eine zusätzliche Kamera zur Verfügung. Geometrische Information ist leichter aus den Entfernungsbildern zu gewinnen, vor allem auf texturarmen Oberflächen. Die Intensitätsinformation hilft zusätzlich bei der Interpretation, gerade auf großen ebenen Oberflächen. Je nach Aufnahmeanordnung und in Abhängigkeit von den verwendeten Instrumenten, können sich die beiden Informationsmodi gegenseitig bei der geometrischen Auflösung ergänzen. Obwohl durch die Laserdaten unmittelbar dreidimensionale Information verfügbar ist und damit die Auswerteprozesse vereinfacht werden, verlangt die große Inhomogenität der Punktanordnung und vor allem die i. A. volle Dreidimensionalität erhöhten Aufwand bei der Verarbeitung und damit auch bei der Modellierung für die Interpretation.
- Die raum-zeitlichen und auch semantischen Modelle der Mustererkennung, etwa in der Form von Markoff-Feldern und Bayes-Netzen, sind bei der Interpretation von Laserdaten gleichermaßen einsetzbar. Bei topographischen Anwendungen, bei denen i. a. luftgestützte Aufnahmen eingesetzt werden, kommen ähnliche oder gar die gleichen Objektmodelle zu Einsatz, mehr noch, können gleichzeitig auch Fernerkundungsdaten verwenden. Bei terrestrischen Anwendungen sind jedoch wegen der Dreidimensionalität der Objekte, vor allem bei der Analyse von Vegetation, die Anforderungen an die Modellierung deutlich höher. Bei der 3D-Erfassung von Industrieanlagen kommt dem Vorwissen über die zu erfassenden Objekte eine besondere Bedeutung zu.
- Der Validierung der Methoden kommt auch hier eine zentrale Rolle zu. Insbesondere erlaubt sie eine kontrollierte Entwicklung der Methoden von vergleichsweise einfachen Aufgaben wie der Detektion und Erkennung von Basisformen, über die Identifikation von Aggregaten bis zur Erkennung und Positionsbestimmung von in CAD-Datenbanken verfügbaren komplexen 3D-Objekten. Der Objektivierung der Qualität

kommt hier eine Schlüsselrolle in der Interaktion zwischen dem Anwender und dem Verfahrensentwickler zu.

Über Interpretations- und Analysemethoden von raum-zeitlichen Relationen zwischen Geo-Objekten besteht eine ähnlich enge, hier nicht weiter ausgeführte, Brücke zur Nachbardisziplin Geoinformatik.

## 4 Schluss

Die Methoden der Mustererkennung und des maschinellen Lernens sind offenbar geeignet, zentrale Probleme in unserem eigenen engeren Fachgebiet der Photogrammetrie zu lösen und gleichzeitig als tragfähige Brücke zu den unmittelbaren Nachbardisziplinen, der Fernerkundung und der Ingenieurgeodäsie zu bilden. Interdisziplinäre Forschungsvorhaben in den genannten Themenbereichen, etwa DFG-Schwerpunkte oder EU-Vorhaben, werden nicht nur keine Schwierigkeiten haben, gefördert zu werden sondern sind m. E. auch dringend erforderlich, um die Innovationskraft in unserem eigenen Forschungsfeld zu stärken und um die für die Anwendung notwendigen Entwicklungen in der Hand zu behalten.

## 4 Literaturverzeichnis

- RIPPERDA, N. & C. BRENNER, C., 2007: *Data driven rule proposal for grammar based facade reconstruction*, Photogrammetric Image Analysis 2007, vol. 36, no. 3/W49A, p. 1-6
- FÖRSTNER, W., 1999: *Semantic Modelling for the Extraction of Spatial Objects from Images and Maps*, Final Report, SMATI '99, Semantic Modelling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps, Munich
- NEUMANN, B.; COHN, A.C.; HOGG, D.C. & MÖLLER, R., (2008): *Logic and Probability for Scene Interpretation*, <http://drops.dagstuhl.de/portals/index.php?seminr=08091>, zuletzt angesprochen: 15. 1. 2009
- VOSSELMAN, G. & TANGELDER, J.W.H.: *3D Reconstruction of Industrial Installations by Constrained Fitting of CAD Models to Images*. In SOMMER, G., N. KRÜGER, C. PERWASS: 'Mustererkennung 2000', Springer, p. 285-292

## Techniques for object-based image analysis

**IRMGARD NIEMEYER<sup>1</sup>, FLORIAN BACHMANN<sup>1</sup>, ALEXEY BRATSKIKH<sup>1</sup>, ANDRÉ JOHN<sup>1</sup>,  
BJARNHEIDUR KRISTINSDÓTTIR<sup>1</sup>, CLEMENS LISTNER<sup>1</sup> & PRASHANTH REDDY MARPU<sup>1</sup>**

*Zusammenfassung: Im Zuge der verbesserten räumlichen Auflösung der optischen Satellitensysteme hat sich seit einigen Jahren die objekt-basierte Bildanalyse etabliert. Mit Definiens Developer (Definiens), ENVI Feature Extraction Module (ITT), IMAGINE Objective (ERDAS) und Feature Analyst (VLS) stehen mittlerweile leistungsfähige und teilweise erweiterbare kommerzielle Softwaresysteme zur Verfügung. Sie erreichen zwar nicht die Genauigkeit der visuellen Interpretation, sind jedoch in der Lage, eine Vorauswahl von relevanten Bildobjekten oder -bereichen zu treffen. Alle Systeme zeigen, je nach Anwendung, noch methodische Schwächen, u. a. in den Bereichen Segmentierung, automatische Merkmalsextraktion und multitemporale Analyse. Der Beitrag stellt einige methodische Entwicklungen zur verbesserten objekt-basierten Änderungsdetektion und Klassifizierung vor. Diese Tools wurden teilweise als Matlab oder IDL Programme, teilweise als Plug-In für die Definiens Developer Software implementiert.*

### 1 Introduction

With the advances in satellite sensor technologies as to spatial resolution, the concept of object-based image analysis has been become widely-used in different remote sensing applications (BLASCHKE et al., 2008). By now, the user might choose from some commercial software systems. Besides Definiens also ITT Visual Information Solutions (ENVI Feature Extraction Module), ERDAS (IMAGINE Objective) and Visual Learning Systems (Feature Analyst) offer platforms for object-based image analysis.

None of the systems achieves the accuracy of human image interpreters, however, all of them are able to at least provide a pre-selection of relevant object features and image objects. The procedures implemented in the systems still show some shortcomings in terms of segmentation, feature extraction, multitemporal analysis, and others.

Against this background, this paper aims to present some recent developments on object-based change detection and classification. In detail, the following algorithms were implemented either as Matlab or IDL programmes, or as plug-ins for Definiens Developer:

- object-based change detection: *bitemporal segmentation, change detection based on object features;*
- object features and feature extraction: *automated extraction of object features, moment invariants;*
- *object-based classification by neural networks.*

The paper introduces the methodologies, describes the implementation and gives some (experimental) results on the application.

<sup>1</sup> Arbeitsgruppe Geomonitoring, Institut für Markscheidewesen und Geodäsie, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg; E-Mail: Irmgard.Niemeyer@tu-freiberg.de, Internet: <http://tu-freiberg.de/fakult3/mage/geomonitoring/>

## 2 Object-based change detection

### 2.1 Bi-temporal segmentation

#### 2.1.1 Methodology

For image data taken over the same area at two different acquisition times, the image segmentation could be generally performed in three different ways (NIEMEYER et al., 2008):

- a) On the basis of the bi-temporal data set, i.e. using a data stack that consists of both scenes;
- b) based on the image data of one acquisition time; the generated object boundaries are then simply assigned to the image data of the second acquisition time without segmentation;
- c) separately for the two times, i.e. the two data sets are segmented independently.

When using a segmentation as suggested in (a) or (b), the resulting image objects have the same geometric properties at the two times, i.e. time-invariant shape features. Change detection can only be applied to a limited number of time-variant object features, such as layer values, texture etc. Provided independent segmentation of the two scenes (c), also the image object geometry varies in time. In this case, all available object features could be used for object change detection.

Object-based change detection requires a segmentation technique that similarly extracts objects that have not changed their shape and size between the two acquisition times. The multiresolution segmentation implemented in the Definiens software uses homogeneity criteria based on colour and shape, and a scale parameter in combination with local and global optimization techniques. Thus, applying the same segmentation parameters to both scenes does hardly produce similar objects in image regions with no or negligible changes, if other parts of the image have changed significantly. Figure 1 shows a simple example for different segmentation results for a bitemporal dataset with only one small change. The dataset consists of one band for time 1 and one band for time 2, the latter being an identical copy of the first time plus small one simulated change (marked in Figure 1 as yellow rectangle).

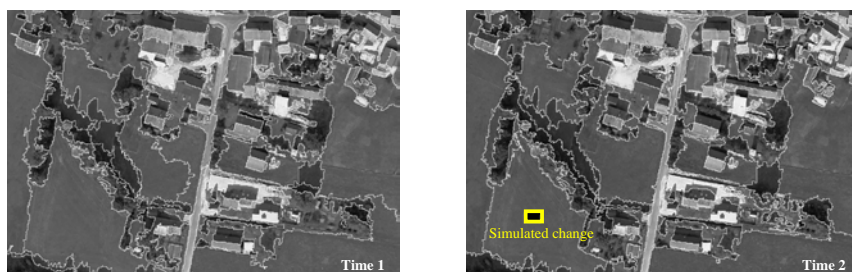


Fig. 1: Independent segmentation of a simulated bitemporal dataset using Definiens Multiresolution Segmentation. Left: Time 1, right: time 2. (LISTNER, 2008, Images © Definiens)

Using Definiens Multiresolution Segmentation as starting point, LISTNER (2008) proposed the following procedure:

1. Segmentation of the first image and assignment of the objects borders also to the second image.
2. Recalculation of the colour homogeneity.
3. Plausibility tests of the second image merges.
4. Splitting of those segments in the second image that do not fulfil the test.
5. Multiresolution segmentation based on this initial segmentation of the second image.

For testing the plausibility of the merges, LISTNER suggested two different techniques, the so-called threshold test and the local best fitting test. Splitting of the segments was done either by global or universal segment adjustment.

### 2.1.2 Implementation

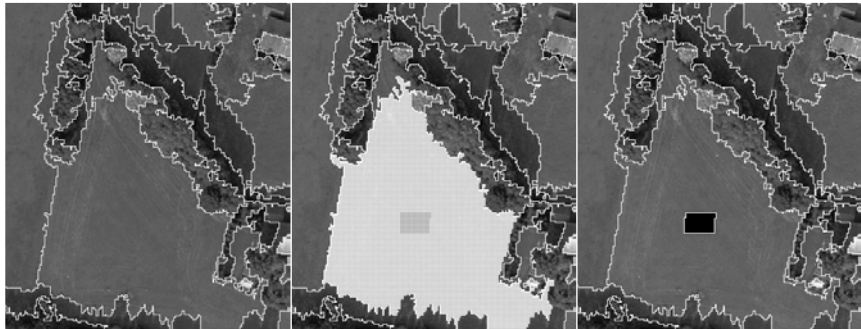
The procedure was programmed and implemented using the development environment Matlab<sup>1</sup> and the Matlab-Toolkit Dipimage<sup>2</sup> (LISTNER, 2008).

### 2.1.3 Experiments

Some experiments were carried out using the simple bitemporal dataset mentioned in 2.1.1. Figure 2 shows the result for the segmentation using the threshold test and universal segment adjustment, Figure 3 displays the results using local best fitting test and global segment adjustment. Both procedures were able to identify the image region where geometric changes occurred between time 1 and time 2, and to adjust the segments.

### 2.1.4 Future work

The next steps will involve intensive testing and enhancement of the techniques and finally the implementation of the procedures as Definiens Developer plug-in.



---

<sup>1</sup> [http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf\\_doc/matlab/getstart.pdf](http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/matlab/getstart.pdf).

<sup>2</sup> [ftp://ftp.qi.tnw.tudelft.nl/pub/DIPlib/Download/docs/dipimage\\_user\\_manual.pdf](ftp://ftp.qi.tnw.tudelft.nl/pub/DIPlib/Download/docs/dipimage_user_manual.pdf).



Fig. 2: Independent segmentation of a bitemporal dataset using the threshold test and universal segment adjustment. Left: segmented image time 1, middle: segmented image time 2 after splitting, right: segmented image time 2 (LISTNER, 2008; Images © DefinienS)

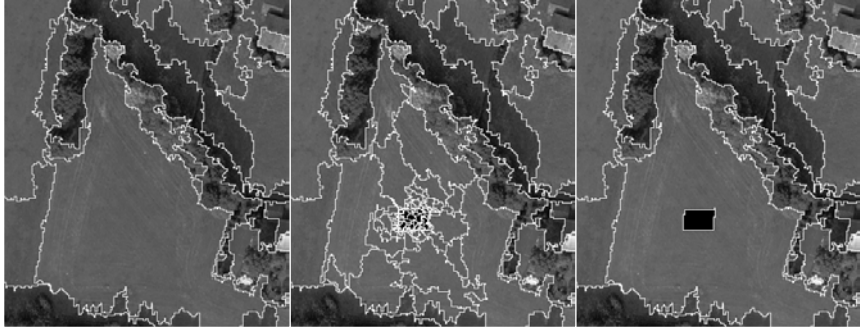


Fig. 3: Independent segmentation of a bitemporal dataset using the local best fitting test and global segment adjustment. Left: segmented image time 1, middle: segmented image time 2 after splitting, right: segmented image time 2 (LISTNER, 2008; Images © DefinienS).

## 2.2 Change detection based on object features

### 2.2.1 Methodology

NIEMEYER et al. (2008) presented the application of the Multivariate Alteration Detection (MAD) transformation (NIELSEN et al., 2008; NIELSEN 2007) based on object features. The MAD transformation is based on a classical statistical transformation referred to as canonical correlation analysis to enhance the change information in the difference images. The procedure is briefly described as follows:

If multispectral images of a scene acquired at times  $t_1$  and  $t_2$  are represented by random vectors  $\mathbf{X}$  and  $\mathbf{Y}$ , which are assumed to be multivariate normally distributed, the difference  $D$  between the two images is calculated by  $D = \mathbf{a}^T \mathbf{X} - \mathbf{b}^T \mathbf{Y}$ . Analogously to a principal component transformation, the vectors  $\mathbf{a}$  and  $\mathbf{b}$  are sought subject to the condition that the variance of  $D$  is maximized and subject to the constraints that  $\text{var}(\mathbf{a}^T \mathbf{X}) = \text{var}(\mathbf{b}^T \mathbf{Y}) = 1$ .

Determining the vectors  $\mathbf{a}$  and  $\mathbf{b}$  in this way is a standard statistical procedure which considers a 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 the MAD components.

The MAD components represent different categories of changes. Since relevant changes of man-made structures will generally be uncorrelated with seasonal vegetation changes or statistic image noise, they expectedly concentrate in different MAD components. If the components are sorted according to the increasing variance, higher order MAD components represent the small-scale changes whereas lower order components contain the overall or wide-area changes.

The MAD transformation was originally developed for pixel-based change detection and was now applied using the object features.

## 2.2.2 Implementation

The MAD transformation was programmed using the Newmat C++ matrix library<sup>3</sup> and Numerical Recipes Software<sup>4</sup> and implemented as Definiens Developer plug-in using the Definiens Software Development Kit (SDK)<sup>5</sup> (JOHN, 2008).

## 2.2.3 Example

A case study was performed using a bitemporal dataset acquired over Olkiluoto, SW-Finland, in June 2005 and July 2006. Definiens Multiresolution Segmentation was applied to the image bands of the second acquisition time and the objects borders were assigned to the image bands of the first acquisition time. For change detection, the MAD transformation was performed based on 16 features: mean value, the mean difference to neighbours, GLCM homogeneity, GLCM mean, in each case for the four given spectral bands. Figure 4 illustrates the changes detected through MAD components 12, 15 and 16.



Fig. 4: QuickBird data acquired over Olkiluoto, Finland, in June 2005 (left) and July 2006 (right). The right image shows the changes detected through MADs 12, 15 and 16.

## 2.2.4 Future work

The MAD transformation based on  $N$  object features results in  $N$  MAD components. If 20 different feature layers are used as input data, the change detection has 20 MAD components as output, which can additionally be split in positive and negative components. Thus, post-processing for labelling change objects (e.g. through classification) becomes necessary and still needs to be implemented.

<sup>3</sup> [http://www.robertnz.net/ol\\_doc.htm](http://www.robertnz.net/ol_doc.htm)

<sup>4</sup> <http://www.nr.com/>

<sup>5</sup> [http://www.definiens.com/definiens-sdk\\_131\\_7\\_8.html](http://www.definiens.com/definiens-sdk_131_7_8.html)

### 3 Object features and feature extraction

#### 3.1 Automated extraction of object features

##### 3.1.1 Methodology

After image segmentation, the image may be represented by hundreds or thousands of image objects. Each object can be described by a wide variety of  $N$  features, such as spectral, shape, texture and hierarchy features, forming an  $N$ -dimensional feature space. Using all the features would lead to far too many dimensions. In fact, a selection of those features is necessary, which implicate a clear separation between classes and to group together objects belonging to the same class.

The tool “SEparability And Thresholds” (SEATH) was developed to prevent the user from getting lost in the feature forest (NUSSBAUM et al., 2006; MARPU et al., 2008a). With a few input samples for every class, it is possible to identify which of the features can be utilized to make rule bases. The Jeffries-Matusita distance,  $J$  (or the Bhattacharya distance,  $B$ ) calculates the statistical measure of separability for every class combination and for every feature under test. The values of  $J$  lie between 0 and 2. If the value of  $J$  is close to 2, the feature has the best separability and can be used to distinguish the classes under test. Moreover, an approximate threshold of separation between the two classes can be identified based on Bayes’ rule.

##### 3.1.2 Implementation

SEATH was programmed and compiled using IDL environment<sup>6</sup>. Moreover, a Graphical User Interface (GUI) was developed using IDL for visualising the separability and thresholds of the object features.

#### 3.2 Moments invariants

##### 3.2.1 Methodology

Most often, when humans look at an image, it is easy for them to recognize objects irrespective of their size, position and orientation. Even poor quality of the observed image does not have much effect on the human ability to recognize familiar objects. In automatic image analysis, like that of remotely sensed data, the computer based recognition and classification of patterns and objects, independent of different variations in their geometry, is an important issue. An approach which has shown to be promising is the mathematical formulation of functions, which are invariant to affine transformations and can be calculated upon images and image objects. For this purpose several descriptors have been used, some of which are moment invariants.

HU (1962) introduced the use and value of statistical moments for pattern recognition problems in 1962. Since then, moment invariants have become one of the classical tools for feature-based object recognition. Many research papers have been devoted to various generalizations and improvements of Hu’s moment invariants and their applications, as well as to develop other types of moment invariants (TEAGUE, 1980; MUKUNDAN & RAMAKRISHNAN, 1998; FLUSSER

---

<sup>6</sup> <http://www.itvis.com/ProductServices/IDL.aspx>

2006). Often it is not clear, which type of moment invariants can be of most help in analysing an image. This is especially true for high resolution satellite imagery. Moment invariants might play a new role for satellite imagery analysis as its spatial resolution gets higher and conventional pixel-based image analysis methods must be combined with or taken over by object-based methods.

### 3.2.2 Experiments

KRISTINSDOTTIR (2008) carried out a comparative study of various moment invariants and discussed their implications for texture analysis, segmentation and classification of high resolution satellite imagery.

Two experiments were performed to evaluate the usefulness of moments invariants for classification in comparison to the object features given in Definiens. 35 object features from Definiens Developer (mean colour, standard deviation, ratio, NDVI, generic shape features, Haralick texture) and 38 moment invariants (from Hu, geometric, affine-blur, Zernike, Pseudo-Zernike and Cartesian Zernike moment invariants) were used to build up the feature space for each object to identify optimal object features to distinguish between the different classes. The test data consisted of two QuickBird-2 scenes acquired in 2002 and 2005 over an industrial site at Olkiluoto in SW-Finland.

The first experiment aimed to evaluate whether moment invariants provide good features to distinguish between different geometric shapes. Class samples for six different geometric shape classes were collected and used as input for SEATH (see 3.1). SEATH estimated the optimal object features from the given 73 attributes that best distinguish between the six classes. The second experiment compared the separability for 11 thematic classes.

Figure 6 illustrates the object samples used for the geometric classes and the separability of classes by using object features from Definiens Developer ( $J_{DD}$ ) and moment invariants ( $J_M$ ). For all classes, moment invariants are at least as good as the Definiens object features, in many cases they seem to be even more suitable. The separability of the land cover classes (Figure 7) shows less consistent results. However, moments invariants seem to be an important object feature for distinguishing between different land cover classes.

### 3.2.3 Implementation & future work

Various moment invariants (geometric, affine, Zernike, Pseudo-Zernike) were programmed and implemented with the Definiens SDK<sup>7</sup> and the IT++<sup>8</sup> library as plug-in to Definiens Developer. This new process enables the user to calculate and utilise moments invariants as object features. As next steps, intensive testing and evaluation of classification rule bases using moment invariants will be carried out.

---

<sup>7</sup> [http://www.definiens.com/definiens-sdk\\_131\\_7\\_8.html](http://www.definiens.com/definiens-sdk_131_7_8.html)

<sup>8</sup> <http://itpp.sourceforge.net/>

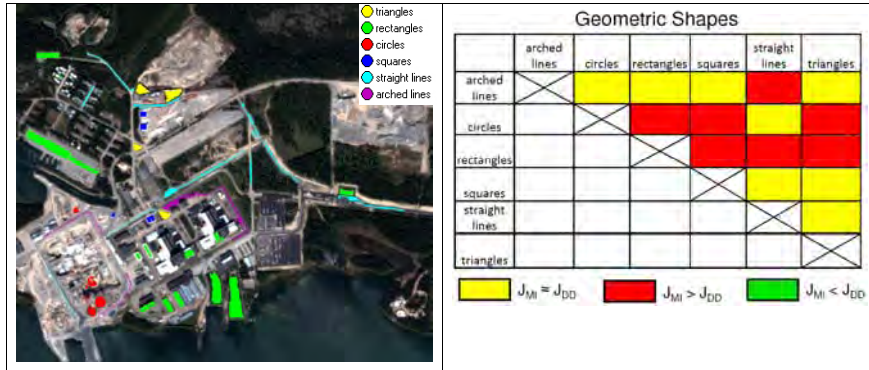


Abb. 5: Object samples used for the six geometric classes (left) and object features, which according to the result of SEaTH are optimal to distinguish between the shape classes (right).  $J_{MI}$  and  $J_{DD}$  denote the highest Jeffries-Matusita distance values for the moment invariant features and the object features from Definiens Developer, respectively.  $J_{MI} \approx J_{DD}$  if and only if  $|J_{MI} - J_{DD}| \leq 0.05$

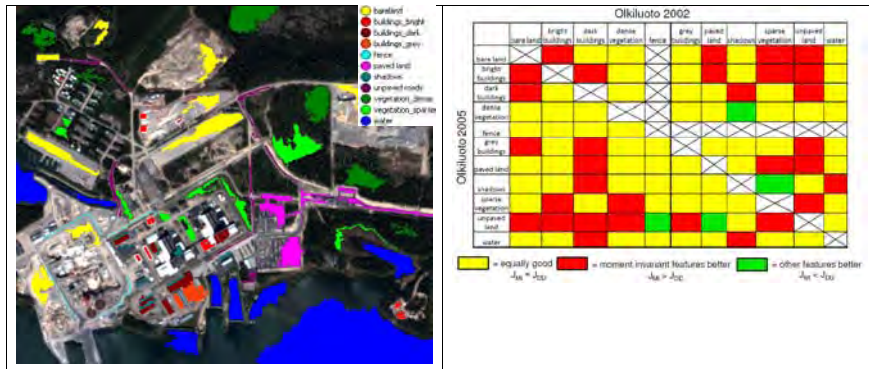


Abb. 6: Object samples used for the 11 land cover classes (left) and object features, which according to the result of SEaTH are optimal to distinguish between the different classes in scenes from Olkiluoto 2002 (upper half, without fence) and 2005 (lower half) (right).  $J_{MI}$  and  $J_{DD}$  denote the highest Jeffries-Matusita distance values for the moment invariant features and the object features from Definiens Developer, respectively.  $J_{MI} \approx J_{DD}$  if and only if  $|J_{MI} - J_{DD}| \leq 0.05$

## 4 Object-based classification by neural networks

### 4.1.1 Methodology

Neural Networks have been well established in pixel-based analysis of remote sensing image data (CANTY, 1999; BISHOP 1995), but have not often be used in object-based approaches.

Three different feed forward network topologies were tested for object-based classification: a standard Feed Forward Network (FFN), a Feed Forward Network “Against Other” (FNNAO) and a Class-Based Feed Forward Network (CBFFN).

When using FNNAO, a specified object class is trained “against” other selected classes (Figure X). The activation signals of ‘is Class’ and ‘is not Class’ are stored into Object Variable.

The class based approach (MARPU et al., 2008b) is based on the idea of class separability. A class is described by a set of features. As these features are often difficult to figure out, tools for automated feature extraction are needed. We have implemented a procedure to automatically define a model for fuzzy classification. A class-based Neural Network is built up by coupling FFNs that identify each class based on pre-selected features.

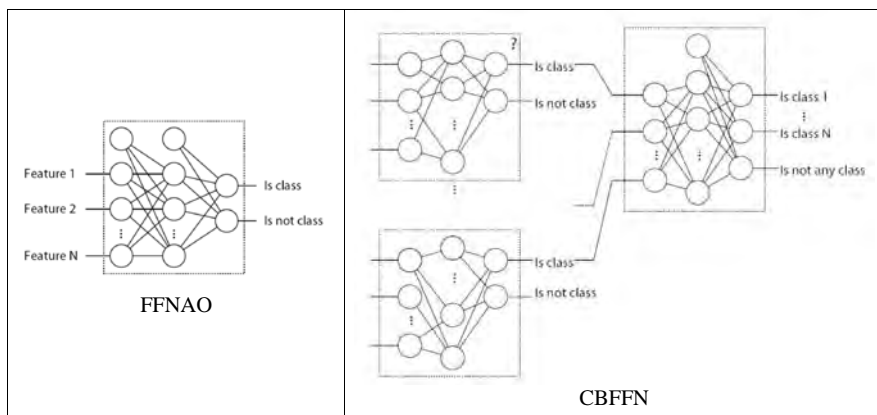


Abb. 7: Network topologies for FNNAO and CBFFN (BACHMANN, 2008)

Three learning algorithms (HAYKIN, 1998; CANTY, 1999) and two combinations for a two-layered feed forward network (FFN) were used: Backpropagation, Kalman Filter Training, Scaled Gradient Conjugated (SCG), Kalman Filter and Backpropagation, Kalman Filter and SCG. The combined algorithms were intended to find the global minimum of the Error Function.

#### 4.1.2 Implementation & future work

The three network topologies with the five learning algorithms were programmed and implemented with Definiens Developer SDK<sup>9</sup> and IT++ library<sup>10</sup>, which can itself make use of Intel’s Math Kernel Library<sup>11</sup>. The plug-in still needs to be intensively tested and evaluated for different classification applications.

<sup>9</sup> [http:// www.definiens.com/definiens-sdk\\_131\\_7\\_8.html](http://www.definiens.com/definiens-sdk_131_7_8.html)

<sup>10</sup> <http://itpp.sourceforge.net/>

<sup>11</sup> <http://www.intel.com/cd/software/products/asmo-na/eng/307757.htm>

## 5 References

- BACHMANN, F.; MARPU, P.R. & NIEMEYER, I., 2008: An Architecture based on Neural Networks. MatGeoS 1st Workshop on Mathematical Geosciences, Freiberg (Germany), June 2008
- BISHOP, C.M., 1995: Neural Networks for Pattern Recognition. Oxford University Press, New York, NY, USA.
- BLASCHKE, T.; LANG, S. & HAY, G., 2008: Object-Based Image Analysis Spatial Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications. Series: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer, Berlin.
- CANTY, M.J., 1999: Fernerkundung mit neuronalen Netzen. Expert Verlag, Renningen-Malmsheim.
- FLUSSER, J., 2006: Moment Invariants in Image Analysis. Proc. World Academy of Science, Engineering and Technology, Volume 11.
- HAYKIN, S., 1998: Neural Networks: A Comprehensive Foundation. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA.
- HU, M., 1962: Visual pattern recognition by moment invariants. IRE Transactions on Information Theory, vol. 8, no. 2, pp. 179–187.
- JOHN, A., 2008: Statistische Detektion und Analyse von Bildobjekt- und Bildelementveränderungen, Research Paper, Geomonitoring Group, Institute of Mine-Surveying and Geodesy, TU Bergakademie Freiberg.
- KRISTINDÓTTIR, B., 2008: Implications of Invariant Moments for Texture Analysis, Segmentation and Classification. Diploma Thesis, Geomonitoring Group, Institute of Mine-Surveying and Geodesy, TU Bergakademie, Freiberg.
- LISTNER, C., 2008: Bildsegmentierung für die objektbasierte Änderungsdetektion digitaler Satellitenbilder. Master Thesis, Geomonitoring Group, Institute of Mine-Surveying and Geodesy, TU Bergakademie, Freiberg.
- MARPU, P.R.; NUSSBAUM, S.; NIEMEYER, I. & GLOAGUEN, R., 2008a: A Procedure for Automatic Object-based Classification. In: Blaschke, T., Lang, S. & Hay, G. (ed.), 2008: Object-Based Image Analysis Spatial Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications. Series: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer, Berlin, pp. 169-184.
- MARPU, P.R.; BACHMANN, F. & NIEMEYER, I., 2008b: A class dependent neural network architecture for object-based classification. GEOBIA 2008, Calgary, 6-7 August 2008.
- MUKUNDAN, R. & RAMAKRISHNAN, K., 1998: Moment Functions in Image Analysis: Theory and Applications. World Scientific.
- NIELSEN, A.A., 2007: The Regularized Iteratively Reweighted MAD Method for Change Detection in Multi- and Hyperspectral Data, IEEE Transactions on Image Processing Vol. 16, No. 2, pp. 463-478.
- NIELSEN, A.A.; CONRADSEN, K. & SIMPSON, J.J., 1998: Multivariate alteration detection (MAD) and MAF processing in multispectral, bitemporal image data: New approaches to change detection studies. Remote Sensing of Environment 64, pp. 1–19.
- NIEMEYER, I.; MARPU, P.R. & NUSSBAUM, S., 2008: Change Detection using Object Features. In: BLASCHKE, T., LANG, S., & HAY, G., 2008: Object-Based Image Analysis Spatial Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications. Series: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer, Berlin, pp. 185-201.
- TEAGUE, M., 1980: Image analysis via the general theory of moments. Journal of the Optical Society of America, vol. 70, no. 8, pp. 920–930.

# Lokalisierung von Objekten in Herbarbelegen

KLAUS PRÄTEL<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: An der Fachhochschule Hannover wurde Mitte 2007 das Projekt "Herbar-Digital" gestartet. In dem Forschungsprojekt "Herbar-Digital" sollen aus 3,5 Millionen Papierbögen (Herbarbelege) des Botanischen Museums Berlin möglichst alle Objekte erkannt werden und separat verarbeitbar sein. Bei den Objekten handelt es sich um Barcodes, Tüten, Stempel, Farbtabelle, Elemente aus dem Pflanzenbereich sowie Hand- und Druckschriften. Es soll unter Zuhilfenahme des ADA-BOOST-Algorithmus vom Verfasser eine Objekterkennung realisiert werden, die folgende Eigenschaften aufweist: Position der zu erkennenden Objekte im Bild variabel, auch dreidimensionale - und konturschwache Objekte müssen erkannt werden, gleiche Objekte unterschiedlicher Form müssen erkennbar sein, das System muss lernfähig sein.*

## 1 Einleitung

Im Projekt „Herbar-Digital“ wurde der Verfasser mit der Aufgabe betraut, Behälter, die Pflanzenteile enthalten, automatisch zu erkennen. Diese Behälter sind in Tütenform ausgeprägt. Die Problematik besteht darin, dass diese Tüten prinzipiell an jeder Stelle des Herbarbeleges in jeder Ausrichtung (geneigt oder gerade) anzutreffen sind. Außerdem ist durch die Füllung der Tüten, die erheblich sein kann, eine gewisse Unschärfe bei der Digitalisierung nicht zu vermeiden. Da die Herbarbelege beim Digitalisieren mit der Informationsseite nach oben auf dem Scanner angeordnet sind, ist es unvermeidbar, dass die Tütenverschlüsse eventuell leicht geöffnet sind. Dies alles erschwert die Erkennung.

Eine weitere Herausforderung sind stark unterschiedliche Tütenformen und Materialien. Bei den Materialien sind auch transparente Modelle vorhanden. Es ist leicht vorstellbar, dass diese besonders anspruchsvolle Erkennungsmethodiken erfordern.

## 2 Beschreibung der Vorgehensweise

Es muss eine Auswertungsstrategie erarbeitet werden, die Tüten erkennt und diese automatisch klassifiziert.

Es kann an der Tütenform, dem Verschluss und der Farbe eine Zuordnung (zumindest die Zeitzuordnung) zu dem Verfasser der Exponate getroffen werden.

Ein Problem ist auch die Anordnung der Tüte auf dem Exponat. In den meisten Fällen ist es schon so, dass die Tüte horizontal ausgerichtet ist. Dies muss jedoch nicht immer so ein. Ebenso ist der Ort der Tüte variabel.

1) Klaus Prätel, Fachhochschule Hannover, Ricklinger Stadtweg 120, 30459 Hannover;  
E-Mail: [klaus.praetel@fh-hannover.de](mailto:klaus.praetel@fh-hannover.de)



Vordergründig haben wir es mit 2 Problemen zu tun:

1. Ort und Ausrichtung der Tüte
2. Erkennung von Form, Verschluss und Farbe

Die Erkennung der Form der Tüte kann, um einigermaßen aussagekräftig zu sein, nur über Erkennungsalgorithmen erfolgen, die in Lernphasen zu immer mehr Informationen gelangt sind. Das Ergebnis der Lernphasen sind Klassifikatoren, die die möglichen Tüten, „repräsentieren“.

Aus diesem Grund werden Boosting-Verfahren untersucht.

Boosting ist ein genereller Ansatz verschiedene Klassifikatoren zu kombinieren, um eine verbesserte Gesamtperformance zu erzielen.

Es soll das ADAPTIVE BOOSTING als ein Vertreter der Boosting-Verfahren betrachtet werden.

Die wesentliche Idee bei allen Boosting-Algorithmen ist, statt eines starken Klassifikators, schwächere Klassifikatoren für ein Entscheidungsproblem einzusetzen, indem man ihre Ergebnisse kombiniert. Der Gedanke dabei ist, dass wesentlich leichter ein paar Faustregeln für ein Problem zu finden sind als eine generelle Regel, die das Problem löst.

Angenommen, es soll ein Programm entwickelt werden, das beim Pferderennen auf den Gewinner tippen soll. Gegeben sind übliche Informationen, wie zum Beispiel die Anzahl der bereits gewonnenen Rennen bei jedem Pferd. Um eine Entscheidungsregel für das Programm aufzustellen, wird ein Experte nach seiner Meinung gefragt. Es ist offensichtlich, dass es ihm schwer fallen wird, eine einzige Regel aufzustellen, anhand derer man auf den Gewinner schließen kann. Umgekehrt ist es aber für ihn viel leichter, ein paar Faustregeln zu nennen (wie zum Beispiel „Tipp auf das Pferd, das in der letzten Zeit oft gewonnen hat“ oder „Tipp auf das Pferd, das die besten Quoten hat“). Es ist einsichtig, dass solche Regeln allein nur ein bisschen besser sind, als zufällig auf ein Pferd zu tippen. Hat man andererseits viele solche Daumenregeln aufgestellt und kombiniert sie zu einer gewichteten Mehrheitsentscheidung, so erhält man einen mächtigen Entscheidungsalgorithmus.

Die Hoffnung besteht darin, dass so kombinierte Daumenregeln bessere Ergebnisse liefern werden, als eine allgemeine Regel. Boosting ist ein Verfahren, das eine effiziente Entscheidungsregel für ein Klassifikationsproblem aufstellt, indem es mehrere einfache Regeln kombiniert. Diese Regeln werden im Folgenden schwache Klassifikatoren oder Basisklassifikatoren genannt. Das Ergebnis dagegen, also die akurate Entscheidungsregel, bezeichnen wir als starken Klassifikator.

Die Idee, Boosting Verfahren für Klassifikationsprobleme einzusetzen, ist relativ neu.

Die ersten Veröffentlichungen zu dem Thema sind 1990 von Freund erschienen. Fünf Jahre später ist der AdaBoost-Algorithmus vorgestellt worden. AdaBoost hat erstaunlich gute Ergebnisse für sämtliche Klassifikationsprobleme geliefert und hat sich somit in den letzten zehn Jahren eindeutig durchgesetzt. Deswegen stehen auch AdaBoost und seine Varianten im Fokus dieser Ausarbeitung.

Boosting ist eine effektive Methode, einen starken Klassifikator zu erstellen, indem man schwache Klassifikatoren kombiniert. Es ist relativ einfach zu entwerfen und hat fast keine Parameter einzustellen. Die einzige Designfrage ist, wieviele und welche Weak-Learner

(schwache Klassifikatoren oder Basisklassifikatoren) verwendet man zum Trainieren. In der Praxis aber geht man meistens so vor, dass man die Weak-Learner für das gegebene Problem bereits gewählt hat. Und dann bietet Boosting ein Gerüst, um sie zu kombinieren. Dadurch, dass der Algorithmus sehr allgemein ist, kann Boosting mit jeder Art von Weak-Learnern umgehen. Dabei reicht es aus, dass die Weak-Learner Hypothesen ausgeben, die nur etwas besser sind, als eine zufällige Hypothese. Sind also die Weak-Learner gut gewählt worden, so erhält man eine Garantie, dass sowohl der Trainings- als auch der Generalisierungsfehler exponentiell sinken. Das in der Ausarbeitung vorgestellte AdaBoost ist der Vertreter der Boostingverfahren und hat sich in den letzten Jahren eindeutig durchgesetzt. AdaBoost und seine Varianten bieten Lösungen nicht nur für Zwei-, sondern auch für Mehrklassenprobleme. Die Experimente mit AdaBoost zeigen, dass AdaBoost sehr oft genauso gute und manchmal sogar viel bessere Ergebnisse liefert als andere Entscheidungsverfahren.

## 2.1 Theoretische Betrachtung

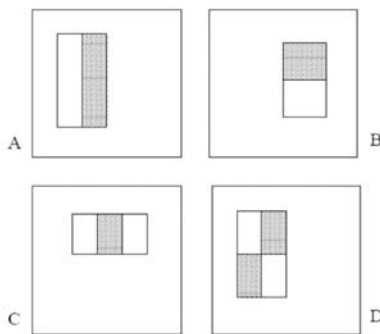


Abb. 1: Beispiel-Rechteck-Features

Die in Abb. 1 gezeigten Features werden dargestellt in ihrer relativen Position zum zu untersuchenden Fenster. Die Summe der Pixel, die in dem weißen Rechteck liegen, werden von der Summe der Pixel, die in dem grauen Rechteck liegen, abgezogen. Zwei-Rechteck-Features werden in der Abbildung 1A und 1B gezeigt, ein Drei-Rechteck-Feature in Abbildung 1C und ein Vier-Rechteck-Feature in Abbildung 1D.

### Features

Object-Detection-Procedures klassifizieren Images, die auf einer Anzahl von einfachen Features basieren. Es gibt viele Gründe, warum eher Features benutzt werden als direkt die Pixel zu verarbeiten. Ein sehr wichtiger Grund ist, dass Feature-basierte Systeme erheblich schneller sind als Pixel-basierte Systeme. Die einfachen Features erinnern an die Funktion, die auf dem Haar-Prinzip basieren. Nehmen wir an, die Auflösung des Detektors ist  $24 \times 24$  Pixel, dann ist der vollständige Umfang der Features sehr groß, nämlich 45396. Eine komplette Basis hat keine lineare Abhängigkeit zwischen den Basiselementen und hat die gleiche Anzahl an Elementen wie

der Bildbereich, in unserem Fall 576. Der volle Satz von 45396 Features ist etliche Male, wie man sagt, over complete!

### Integral Image

Rechteck-Features können schnell verarbeitet werden, wenn man über eine Zwischenbild-Darstellung geht, die Integral Image genannt wird. Das Integral Image (siehe Abb. 2) an der Stelle x,y beinhaltet die Summe der Pixel oberhalb und links von x,y:

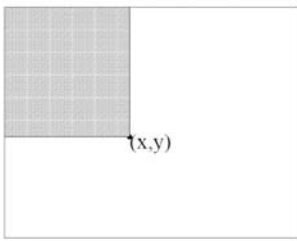


Abb. 2: Integral-Image

$$ii(x, y) = \sum_{x' \leq x, y' \leq y} i(x', y')$$

wobei  $ii(x,y)$  das Integral Image ist und  $i(x,y)$  das Original Image. Benutzt wird das folgende Paar von Rekursionen:

$$s(x, y) = s(x, y - 1) + i(x, y)$$

$$ii(x, y) = ii(x - 1, y) + s(x, y)$$

(wobei  $s(x,y)$  die kumulierte Reihensumme ist,  $s(x,-1)=0$ , und  $ii(-1,y)=0$ ), das Integral Image kann in einem Durchlauf über das Original Image gebildet werden.

Benutzt man das Integral Image, kann jede Rechtecksumme über 4 Feldreferenzen (siehe Abb. 3) bearbeitet werden.

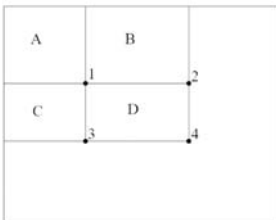


Abb. 3: Integral-Image  
Feldreferenzen

Die Summe der Pixel im Rechteck D wird berechnet aus 4 Feldreferenzen. Der Wert des Integral Image an der Stelle 1 ist die Summe der Pixel im Rechteck A. Der Wert an der Stelle 2 ist  $A + B$ , an der Stelle 3  $A + C$  und an der Stelle 4  $A + B + C + D$ .

Die Summe in D wird berechnet  $4 + 1 - (2 + 3)$ .

### **Klassifikationsfunktion**

Zur Erinnerung: Jedes Image Sub-Window hat 45396 Rechteck-Features, eine Anzahl, die erheblich größer ist als die Anzahl der Pixel. Wenngleich jedes Feature sehr effizient bearbeitet werden könnte, ist die Bearbeitung aller Features überaus aufwändig. Die Hypothese ist, dass eine kleine Anzahl von Features zu einem effektiven Klassifikator vereint werden kann. Die Hauptaufgabe ist es, diese Features zu finden.

In dem verwendeten System wurde eine Variante von AdaBoost benutzt, die zum Selektieren der Features und zum Trainieren des Klassifikators geeignet ist. In der Originalform wird der AdaBoost-Lernalgorithmus zum Verbessern der Klassifikations-Performance eines einfachen Lernalgorithmus benutzt. Dies funktioniert über Verbinden eines Pools von Weak-Klassifikatoren-Funktionen, um einen starken Klassifikator zu erzeugen. In der Sprache des Boosting ist ein einfacher Lernalgorithmus ein Weak-Learner. So sucht z.B. der Perceptron-Lernalgorithmus über einen Satz von möglichen Perzeptren und liefert ein Perceptron mit dem kleinsten Klassifikations-Fehler. Der „Lerner“ wird „weak“ genannt, weil man nicht die bestmögliche Klassifikationsfunktion zum Klassifizieren von Trainingsdaten erwartet (für ein gegebenes Problem reicht ein Perceptron aus, das die Trainingsdaten korrekt zu 51% klassifiziert). Um einen Weak-Learner zu boosten, gilt es einige Lernprobleme zu lösen. Nach der ersten Runde des Lernens müssen die Trainingsdaten derart gewichtet werden, dass die, die unkorrekt klassifiziert wurden, durch den vorigen weak-Klassifizierer in ihrer Wichtung angehoben werden.

Der abschließende starke Klassifikator nimmt die Form eines Perceptrons ein.

Die konventionelle AdaBoost-Prozedur kann als ein „gieriger“ Feature-Auswahl-Prozess bezeichnet werden.

Abschließend kann gesagt werden, dass AdaBoost eine effektive Prozedur zum Suchen von einer kleinen Anzahl von guten Features ist, die eine signifikante Vielseitigkeit haben.

## **2.2 Praktische Anwendung**

Zur Anwendung kam ein Softwarepaket der Firma Intel, genannt openCV. Es müssen insgesamt 4 Schritte durchlaufen werden:

1. Vorbereitung
2. Sample-Erzeugung
3. Training
4. Test
5. Bei Bedarf ist ein Performancetest der Kaskade vorzunehmen.

### 2.2.1 Vorbereitung

Es müssen zum Training positive (Objekt im Bild vorhanden) sowie negative (Objekt im Bild nicht vorhanden) Samples vorhanden sein. Wegen der Kompressionsartefakte in einigen Kompressionsleveln von JPEG-Images ist ein BMP-Imageformat zu bevorzugen. Die Anzahl der negativen Samples sollte sich in der Größenordnung von 5000 bis 10.000 Bildern bewegen. Sicher ist eine Anzahl der positiven Samples in der gleichen Größe wünschenswert, jedoch ergeben auch erheblich kleinere Mengen ein akzeptables Ergebnis (500 bis 800).

### 2.2.2 Sample-Erzeugung

Es wird davon ausgegangen, dass eine Samplegröße von 20x20 eine gute Größe für die meisten Objekte ist. Deshalb werden die Objekte auf diese Größe reduziert.

Grundsätzlich werden 4 Sätze von Bildern bearbeitet:

1. Ein positiver Exemplarsatz, der das Objekt darstellt, auf das trainiert werden soll
2. ein anderer positiver Bildersatz für Testzwecke
3. ein negativer Bildersatz ( ein sogenannter Hintergrund ) zum Trainieren
4. ein zusätzlicher negativer Bildersatz zum Testen

**Achtung: Die Testsätze sollten keine images enthalten, die für das Training benutzt werden!!**

Natürlich muss die Verteilung der Images in Training und Test sinnvoll angelegt sein. Die Erfahrungen haben gezeigt, dass bei z.B. 5500 images die Verteilung 5350 für das Training und 150 images für das Testen angebracht sind.

### 2.2.3 Training

Zum Training der Kaskaden werden dem Trainingstool die Sammlungen der positiven sowie negativen Samples zur Verfügung gestellt. Das Ergebnis ist eine Kaskade, die vom Testingtool benötigt wird.

### 2.2.4 Testing

Das Testingtool bekommt als Eingabeparameter die Kaskade des Trainings sowie die zu untersuchenden Samples. Bei Erkennung des Objektes wird dieses durch ein grünes Rechteck gekennzeichnet. Der zu testende Herbarbeleg wird dem Testtool auf direktem Wege, also über eine Web\_Cam, zur Verfügung gestellt oder es wird ein Herbarbeleg in Form eines Files des Formates .BMP angeboten.

## 3 Ergebnisse

Am Beispiel in Abb. 4 ist zu erkennen, dass die Art des Tütenverschlusses stark variieren kann. Man sieht am oberen Objekt, dass der Verschluss leicht geöffnet ist und somit etwas unscharf dargestellt wird. Dies beeinträchtigt jedoch die Erkennung nicht. Das untere Objekt zeigt keinen sichtbaren Verschluss, auch dies führt nicht zum Fehler. In Abb. 5 wird dem Testprogramm der Herbarbeleg über eine Web-Cam zur Erkennung des Objektes zur Verfügung gestellt. Im

mittleren Bildausschnitt ist das grüne Rechteck zu erkennen, das das Objekt umringt. Da es sich in dieser Anwendung um eine Life-Auswertung handelt, folgt das grüne Rechteck dem Objekt, wenn der Herbarbeleg vor der Kamera bewegt wird. Dies wird bei dem Vortrag des Verfassers vorgeführt.

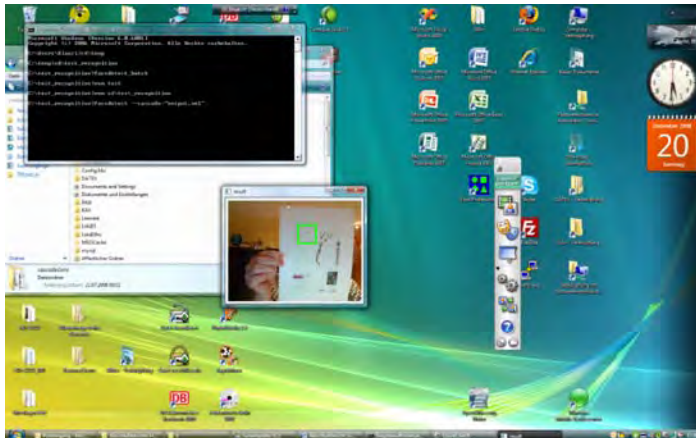


Abb. 5: Objekterkennung über Web-Cam

## 4 Auswertung

Es wurden insgesamt 549 Herbarbelege ausgewertet. Durch Vorkommen von mehreren Objekten pro Herbarbeleg ergeben sich in den Summen der zu verarbeitenden Objekte größere Werte als die Anzahl der Herbarbelege. Besondere Zustände der Objekte sind explizit in der Auswertung beschrieben.

Abb. 6 zeigt die Aufsummierung der Ergebnisse für HIT ( Treffer ), MISS ( nicht erkannt ) und FALSE, ( falsch erkannt ).

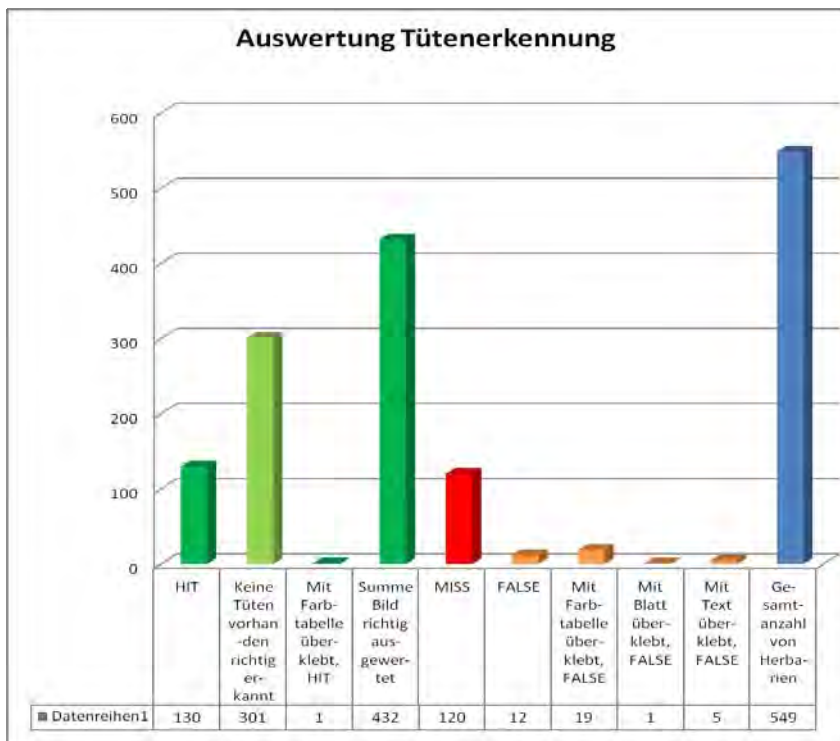


Abb. 6: Auswertung Tütenerkennung

Auszug aus Performance-Test der Kaskade. Dieser zeigt das Ergebnis aus Abb. 7.

3 HIT, 0 MISS, 2 FALSE.

Bezeichnung	HIT	MISS	FALSE
4_Herbarium230.bmp	3	0	2
4_Herbarium231.bmp	1	0	2



Abb. 7: 4\_Herbarium230.bmp



## **5 Literaturverzeichnis**

- VIOLA, P. & JONES, M., 2001: Robust Real-time Object Detection, Vancouver, Canada, July 13, 2001
- ADOLF, F., 2003: How to build a cascade of boosted classifiers based on Haar-like features, September 2, 2003
- STEINKE, K.-H.; DZIDO, R.; GEHRKE, M. & PRÄTEL, K., 2008: Feature recognition for herbarium specimens (Herbar-Digital), Proceedings of TDWG, Perth,

## IMALYS – Konzept und Entwicklung objektorientierter Klassifikation auf Datenbankbasis

MARKUS REINHOLD<sup>1</sup>, EVELIN MATEJKA<sup>1</sup> & PETER SELSAM<sup>1,2</sup>

*Zusammenfassung: Mit IMALYS wird ein Werkzeug zur Klassifikation und Extraktion realweltlicher Objekte aus digitalen Fernerkundungsdaten vorgestellt, das objektorientierte Methoden der Bildanalyse implementiert und für die Anbindung an ein relationales Datenbanksystem konzipiert ist.*

*Der Bildanalyse durch IMALYS liegt die Abgrenzung bildstatistisch homogener Bereiche, der sogenannten Zellen, zugrunde, welche die erste Ebene einer mehrstufigen Abstraktion von Bildinhalten repräsentiert. Die zweite Stufe umfasst die Analyse von benachbarten Zellpaaren und der näheren Umgebung einer Zelle auf typische Merkmale und Merkmalskombination. In einer dritten Stufe erfolgt die Klassifikation der Zelle entsprechend des zur Verfügung stehenden Klassifikationsschemas.*

*Die von IMALYS implementierten und ausführbaren Funktionen schließen neben Import und Exportfunktionen die Zellbildung, Ableitung von Zellmerkmalen und Klassifikation der Bilddaten ein. Die Entwicklungsziele für die Software umfassen die Anbindung an ein Datenbanksystem zur permanenten Sicherung, Bewertung und Modifikation des während der Klassifikation extrahierten Wissens und die Integration des IMALYS-Arbeitsprozesses in ein Geoinformationssystem.*

### 1 Einleitung

Die rechnergestützte Auswertung von digitalen Satelliten- und Luftbilddaten wird seit Jahrzehnten praktiziert. Die Komplexität des zu analysierenden Datenmaterials hat sich mit der in den letzten Jahren erfolgten Inbetriebnahme hochauflösender Satellitensensoren wie IKONOS (DIAL et al., 2003) oder QuickBird (TOUTIN & CHENG, 2002) und dem vermehrten Aufkommen von zeitlich kurzfristig einsetzbaren Flugdrohnensystemen mit Fernerkundungsfunktion (EISENBEISS, 2004; LELONG et al., 2008; EVERAERTS, 2008) erhöht. Entsprechendes gilt für die Anforderungen an Bild- und Datenanalyse, speziell im technischen und methodischen Bereich. Technisch umfassen diese erhöhten Anforderungen die Gewährleistung einer konsistenten Datenhaltung und die nahtlose Integration der Verfahren in die Arbeitsumgebung von GI-Systemen. Methodisch erfordern der Bedarf an kurzfristig abzuleitender Geoinformation und die Vielzahl von Nutzerbedürfnissen die Erforschung und Entwicklung effizienter und angepasster Analyseverfahren zur Klassifikation und Auswertung. Zudem ist es notwendig, die entwickelten Verfahren in die zweckentsprechenden Systeme für Landschaftsmanagement, Modellierung oder Entscheidungsunterstützung zu integrieren.

Als ein Ergebnis der Forschungsarbeiten in diesem Bereich stellen wir IMALYS, ein Softwaresystem zur Extraktion und Klassifikation geographischer Objekte aus digitalen

---

<sup>1</sup> Markus Reinhold, Evelin Matejka und Peter Selsam, Lehrstuhl für Geoinformatik, Geohydrologie und Modellierung, Institut für Geographie, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Löbdergraben 32, 07737 Jena; E-Mail: {markus.reinhold, evelin.matejka, peter.selsam}@uni-jena.de

<sup>2</sup> Peter Selsam, H.G. Geo Data Solutions GmbH, Talstraße 84, 07743 Jena

Bilddaten, vor. IMALYS ist als Teil eines modular aufgebauten und sich in Entwicklung befindenden Integrierten Landschafts-Managementsystems (KRALISCH et al., 2006) konzipiert, aber auch unabhängig davon lauffähig und einsetzbar. Abb. 1 zeigt ein Bildschirmfoto der IMALYS-Oberfläche.



Abb. 1: Bildschirmfoto der IMALYS-Oberfläche.

## 2 IMALYS: Konzept

IMALYS implementiert Verfahren der objektorientierten Bildanalyse zum Zweck der Identifikation und Klassifikation geographischer Objekte in digitalen Fernerkundungsdaten. Bei der objektorientierten Bildanalyse dienen nicht die eigentlichen Bildpixel als Grundlage der Datenauswertung, sondern auf der Basis von statistischen Kriterien erstellte finite Elemente, die Gruppierungen der ursprünglichen Bildelemente entsprechen. Mit Bezug auf IMALYS werden diese finiten Elemente als Zellen bezeichnet.

Bei der Bildanalyse spielen aus den Bilddaten selbst hervorgegangene Vorbilder, im Nachfolgenden als Referenzen bezeichnet, eine herausragende Rolle. Anhand dieser Referenzen erfolgt die Definition des zu verwendenden Klassifikationsschemas und im weiteren Verlauf durch Rückgriff auf die Zellen und ihre Eigenschaften die Bestimmung und Ableitung typischer Merkmale und Attribute der jeweiligen Klassen. IMALYS greift dafür auf ein Objektmodell zurück, das auf räumlicher Kombination der Zellen und aller mit ihnen verknüpften Eigenschaften beruht und eine mehrstufige Abstraktion von Bildinhalten repräsentiert.

Zunächst zerlegt IMALYS unter Berücksichtigung von Intensitäts- und Kontrastinformationen das Originalbild in statistisch homogene Bereiche, die sich hinsichtlich der Grauwertvarianz von ihren jeweiligen Nachbarn signifikant unterscheiden. Das Ergebnis dieses Vorgangs, der allgemein als Segmentierung, hier als Zellbildung bezeichnet wird, stellt die erste Abstraktionsstufe des Objektmodells dar. Die Ableitung von Merkmalen und Attributen erfolgt auf Basis der abgeleiteten Zellen und in ihrer Kombination beschreiben Zellgrenzen und

Zellmerkmale das Datenmaterial vollständig. So wird der Informationsgehalt des Originals konserviert, die weitere rechentechnische Verarbeitung jedoch erleichtert.

Bildstatistisch homogene Bereiche entsprechen in der Regel nicht geographischen Objekten in der realen Welt. Vielmehr setzen sich diese – je nach betrachtetem Skalenbereich und räumlicher Auflösung des Datenmaterials – aus mehreren Zellen mit zum Teil sehr unterschiedlichen Eigenschaften zusammen. In einem zweiten Abstraktionsschritt analysiert IMALYS daher das entstandene Zellbild unter zwei Aspekten, die in Kombination die Beschreibung komplexer Zellverbindungen erlauben: (1) Benachbarte Zellpaare werden auf typische Kombinationen bzw. Nachbarschaften von Merkmalen hin untersucht und diese mit dem jeweiligen Zellpaar verknüpft. (2) Die räumliche Umgebung jeder Zelle wird auf die relative Häufigkeit des Auftretens bestimmter Merkmale hin untersucht und damit typische Eigenschaften des räumlichen Kontextes extrahiert. Die Kombination der Ergebnisse beider Prozesse erlaubt die Ableitung eines auf Fuzzy-Logik basierenden Wahrscheinlichkeitswerts, der die Zugehörigkeit der entsprechenden Zelle zu einer bestimmten Objektklasse repräsentiert. Dieses Resultat kann als zweite Abstraktionsstufe des Objektmodells bezeichnet werden.

Im letzten Schritt verwendet IMALYS ein aus den Referenzdaten abgeleitetes Maß für die typische Objektgröße der betrachteten Objektklasse und die im vorherigen Schritt berechnete Wahrscheinlichkeit als Eingangsdaten für einen optimierten Klassifikationsprozess. Das Resultat dieses Arbeitsschritts stellt die dritte Abstraktionsstufe des Objektmodells dar und entspricht – in Abhängigkeit vom gewählten Klassifikationsschema – realen geographischen Objekten bzw. Landbedeckungsklassen.

### 3 IMALYS: Funktionen

Das Softwarewerkzeug IMALYS besteht aus mehreren, einzeln ansteuerbaren Modulen, die folgende Funktionen bereitstellen: (1) Die Zellbildung als Zusammenfassung statistisch homogener Bildbereiche. (2) Die Ableitung standardisierter und nutzerdefinierter Zellmerkmale und deren Sicherung mit raumbezogenen und topographischen Zellinformationen in einer Datenbanktabelle. (3) Die optimierte Klassifikation des Zellbildes anhand der zur Verfügung gestellten Referenzdaten und den abgeleiteten Zellmerkmalen.

Daneben erlaubt IMALYS den Im- und Export häufig verwendeter Raster- und Vektordatenformate und die Anwendung verschiedener Filter auf Pixelebene. Die nachfolgende Erläuterung der implementierten Hauptfunktionen folgt einem typischen Arbeitsablauf mit dem Softwarewerkzeug und soll anhand des links in Abb. 2 dargestellten und beispielhaft ausgewählten Satellitenszenenausschnitts illustriert werden.

#### 3.1 Zellbildung

Die Zusammenfassung der originalen Bildpixel in statistisch homogene Bereiche, die sich von ihren Nachbarn signifikant unterscheiden, stellt eine Schlüsselfunktion objektorientierter Bildanalysewerkzeuge dar. Größe und Form der abgeleiteten Zellen beeinflussen die späteren Arbeitsprozesse und damit entscheidend die Qualität des Klassifikationsresultats.

Aus der Vielzahl vorgestellter Algorithmen (FU, 1981; PAL, 1993; FREIXENET et al., 2002) implementiert IMALYS zur Zellbildung ein Verfahren, das einen Watershed- und einen Region-

growing-Algorithmus kombiniert. Der Watershed-Algorithmus verwendet dabei den normalisierten Maximalkontrast bzw. die Modulation (SCHOWENGERDT, 2007) des Originalbildes, um eine erste Kontrastschwelle festzulegen. Benachbarte Pixel werden zu Zellen zusammengefasst, wenn ihr Grauwertkontrast unter dieser Schwelle liegt. Der zulässige Kontrast wird während des Programmlaufs in kleinen Schritten erhöht, um sukzessive größere Zellen zu bilden. Dabei werden grundsätzlich nur Einzelpixel mit bereits bestehenden Zellen zusammengefasst, Zellen unterhalb einer Mindestgröße nach jedem Iterationsschritt wieder in Einzelpixel aufgelöst. Damit eignet sich dieses Verfahren für die Differenzierung stark strukturierter Bildbereiche, die in einer Vielzahl kleiner Zellen resultieren. Da der Region-Growing-Algorithmus für Zellen größerer Fläche qualitativ bessere Ergebnisse gewährleistet, setzt seine Wirkung nach Erreichen einer bestimmten Zellgröße ein. Benachbarte Zellen werden in der Folge in Abhängigkeit ihres Kontrasts und der Länge der gemeinsamen Grenze zusammengefasst. Das Zellwachstum endet, wenn Varianz und Größe der Zellen einen Schwellwert erreichen, der den einzigen notwendig vom Benutzer festzulegenden Eingangsparameter darstellt. Der Benutzer ist optional in der Lage, eine Mindestzellgröße festzulegen und bereits vorhandene Datensätze (z.B. administrative Grenzen) in die Zellbildung zu integrieren. IMALYS kann das Ergebnis der Zellbildung in verschiedenen Graden glätten und als Vektordatensatz exportieren. Ein Beispielresultat ist im rechten Teil von Abb. 2 dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass von IMALYS abgeleitete Zellen in ihrer Größe stark variieren können. Eine detaillierte Erläuterung der Funktionsweise der von IMALYS implementierten Zellbildungsalgorithmen und eine empirische Auswertung der Ergebnisse erfolgt in REINHOLD et al., 2008.

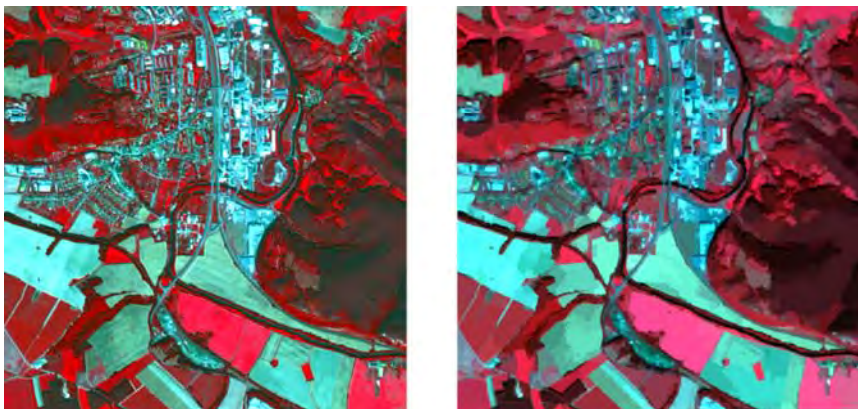


Abb. 2: Links die aus dem panchromatischen Kanal und den multispektralen Kanälen des SPOT-Sensors fusionierte Beispielszene. Dargestellt ist ein ca. 12 km<sup>2</sup> großes Gebiet südlich von Rudolstadt (Thüringen), die Aufnahme stammt vom 10. September 2006. Rechts das Ergebnis der IMALYS-Zellbildung, die Zellen sind entsprechend ihres mittleren Grauwerts in den verwendeten Kanälen eingefärbt.

### 3.2 Ableitung von Bildmerkmalen

IMALYS erlaubt es, den ermittelten Zellen eine Reihe von Merkmalen zuzuweisen, die aus den ursprünglichen Grauwerten des Bildes, der Zellgeometrie und ihren gegenseitigen Nachbarschaftsbeziehungen abgeleitet werden. Zusätzlich definiert IMALYS für jede Zelle einen räumlichen Kontext, in dem die physikalischen Merkmale ihrer geographischen Umgebung repräsentiert sind. Die von IMALYS ableitbaren Merkmalsarten werden im Folgenden näher beschrieben:

- Spektrale Merkmale werden aus den Grauwerten der Eingangskanäle berechnet und über die gesamte Zellfläche gemittelt. Sie umfassen Größen wie Mittelwert eines Kanals, spektrale Dichte oder Helligkeit.
- Pixelbezogene Merkmale umfassen Maße zur Quantifizierung von Texturen und Mustern.
- Form- und Lagemerkmale ergeben sich aus der Geometrie der abgeleiteten Zellen und umfassen Fläche, Umfang, Breite und Länge sowie die relative Lage der betrachteten Zelle innerhalb des Bildes. Zusätzlich baut IMALYS eine komplette Zelltopologie auf, welche die Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Teilflächen wiedergibt.
- Kontextmerkmale registrieren die Häufigkeit des Auftretens bestimmter Merkmale und Merkmalskombinationen in der Umgebung einer Zelle. Dabei werden sowohl direkte als auch indirekte Nachbarn berücksichtigt.
- Thematische Merkmale erlauben die Integration bereits bestehender Klassifikationsergebnisse in den Arbeitsablauf, ihre Wirkungsweise lässt sich mit der von Masken vergleichen.
- Kombinierte Merkmale werden aus den bereits beschriebenen Merkmalen abgeleitet. Typische Beispiele wie der NDVI sind bereits in IMALYS implementiert, dem Benutzer ist es außerdem möglich, über einen Formeleditor bestehende Merkmale durch mathematische Ausdrücke zu verknüpfen und damit neue Merkmale zu definieren.

Alle von IMALYS abgeleiteten Zellmerkmale werden in einer Datenbank-Tabelle abgelegt, welche nach Abschluss des Vorgangs alle quantifizierten Eigenschaften der Zellen enthält. Es ist möglich, diese Merkmale per Datenbankschnittstelle oder manuell zu ergänzen und zu modifizieren. IMALYS erlaubt außerdem den Export der abgeleiteten Merkmale im Vektor- und Rasterformat zur Visualisierung in entsprechenden GI-Systemen.

### 3.3 Klassifikation anhand von Bildmerkmalen und Referenzdaten

Referenzdaten dienen IMALYS als Vorbild für die automatische Klassifikation. Sie markieren für jede gewünschte Klasse typische und genau bekannte Bildbereiche. Ihre Festlegung erfolgt in einem separaten Programm, in der Regel einem GI-System. Dabei sollten die Referenzen eine größere Zahl von Zellen einschließen, da Form- und Lagekriterien bei der Klassifikation berücksichtigt werden. Zudem wird für statistische Analysen eine Mindestanzahl von Zellen benötigt. Da IMALYS die referenzierten Gebiete intern in Unterklassen mit homogenen Eigenschaften aufteilt, ist es möglich, sehr heterogene Beispiele unter einem Klassennamen zusammenzufassen. Vor jeder Klassifikation analysiert IMALYS die definierten Referenzen nach geographischen und statistischen Kriterien und entscheidet selbstständig, welche der abgeleiteten Merkmale für die Klassifikation benötigt werden. Ergebnis dieser Referenzanalyse sind optimierte Muster und Regeln, mit denen IMALYS alle zur Verfügung gestellten Referenzen mit einem Minimum an Aufwand fehlerfrei reproduzieren kann.

Zur Durchführung der Klassifikation stellt IMALYS dem Benutzer drei Varianten zur Verfügung. Dabei bedienen sich der Gewebeklassifikator (1) sowie der vollautomatische Clusterer (2) des besprochenen Objektmodells zum Vergleich zwischen Referenzen und Zelle. Der manuelle Klassifikator (3) verwendet allein vom Benutzer festgelegte Schwellen. Gemeinsam ist allen drei Klassifikatoren, dass sie ausschließlich anhand des Zellbilds und der Merkmalstabelle arbeiten und die ursprünglichen Bilddaten zur Klassifikation nicht verwenden. Der (1) Gewebeklassifikator führt intern ein zweistufiges Verfahren aus, bei dem zunächst geprüft wird, inwiefern eine Zelle, die durch das Referenzgebiet der jeweiligen Klasse definierten Kriterien für die Merkmalsausprägung erfüllt. Ist das der Fall, wird sie der entsprechenden Klasse zugeschlagen. Falls nicht, so weist der Regelklassifikator die betreffende Zelle einer Rückweisungsklasse zu. Bei sehr sorgfältig gesetzten Referenzen dominiert diese Rückweisungsklasse. Je nach Aufgabenstellung kann damit auch das Endergebnis der Klassifikation erreicht sein. In einem zweiten Klassifikationsschritt wird die Ähnlichkeit der Zellcharakteristika mit den Referenzen bestimmt. Diese Musterklassifikation weist die Zelle schließlich der Klasse mit der größten Ähnlichkeit zu, wobei dies nach dem Prinzip der Fuzzy-Logik geschieht. In üblichen Anwendungsfällen arbeitet der Gewebeklassifikator so, dass die Regelklassifikation die Anzahl der in Frage kommenden Klasse für eine Zelle auf eine überschaubare Gruppe reduziert und die Musterklassifikation im Anschluss in allen mehrdeutigen Fällen über die endgültige Klasse entscheidet. In Abb. 3 rechts ist das Ergebnis einer mit dieser Variante durchgeführten Klassifikation dargestellt, der linke Teil zeigt beispielhaft gesetzte Referenzgebiete.

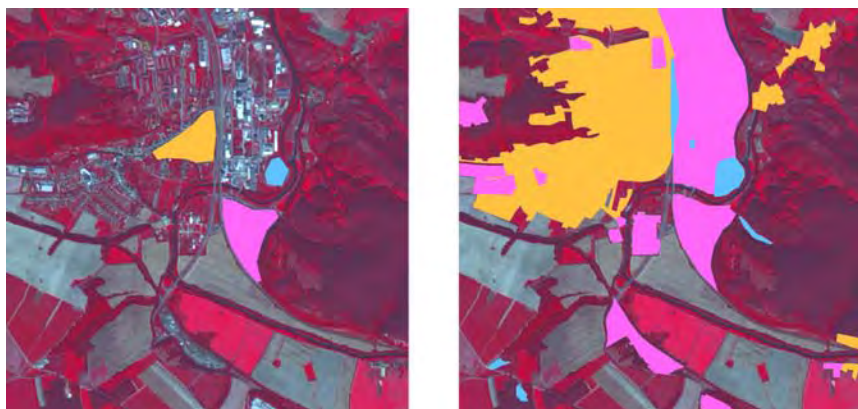


Abb. 3: Links beispielhaft gesetzte Referenzdaten. Die abgebildeten Polygone repräsentieren Wohn- (orange) und Industriebebauung (violett) bzw. andere anthropogen überprägte Flächen (blau). Im Vergleich mit dem Zellbild in Abb. 2 ist zu erkennen, dass Referenzgebiete nicht mit Zellgrenzen zusammenfallen müssen. Rechts das Ergebnis der IMALYS-Klassifikation für die ausgewählten Referenzgebiete. Im vorliegenden Fall waren ausschließlich die verschiedenen Siedlungstypen von Interesse.

Mit Hilfe des Clusterers (2) kann IMALYS eine automatische Klassifikation durchführen, dabei verwendet dieses Verfahren im Wesentlichen dieselben Techniken wie die Zellbildung. Allerdings erlaubt der Clusterer auch die Zusammenfassung von Zellen, die geographisch nicht benachbart sind. Die Merkmale eines Clusters werden aus dem ihn umgebenden Zellen gemittelt, in der Folge weist IMALYS dem Cluster weitere Zellen zu, wenn das Produkt aus Zellgröße und Differenz der Merkmale ein Minimum erreicht. Bei kleinen Flächen erlaubt IMALYS entsprechend etwas größere Unterschiede bei den Merkmalen. Es wird eine Rückweisungsklasse gebildet, der Zellen zugewiesen werden, die zu große Differenzen im Vergleich mit allen anderen Clustern aufweisen und für die nicht ausreichend ähnliche Exemplare gefunden wurden.

Der manuelle Klassifikator (3) klassifiziert mittels einfacher SQL-Abfragen, die auf die abgeleitete Merkmalstabelle angewendet werden und so für jede Klasse einen zulässigen Merkmalsraum definieren. Dabei können aus überlappenden Merkmalsräumen neue Klassen generiert werden. So erlaubt der manuelle Klassifikator die Abgrenzung von Bereichen mit genau bekannten physikalischen Bildmerkmalen.

## 4 IMALYS: Entwicklung

Das Ergebnis des Klassifikationsprozesses ist ein thematischer Datensatz, der die Zugehörigkeit aller Zellen zu den jeweiligen Klassen wiedergibt. Um diese Zuweisung vorzunehmen, extrahiert der Klassifikator aus Zellmerkmalen und Zellbild die Charakteristika, die für die jeweilige Klasse als typisch gelten können. Da es das endgültige Ziel der Entwicklungsarbeiten an IMALYS ist, ein System zur weitgehend automatisierten Klassifikation bereitzustellen, ist es notwendig, diese als typische zu erachtenden Eigenschaften zu sichern, im Vergleich mit anderen Klassifikationsergebnissen zu bewerten und gegebenenfalls zu verwerfen bzw. zu modifizieren. Im Erfolgsfall kann das so gespeicherte Wissen erneut auf ähnliche Szenen und Aufgabenstellungen angewendet werden. Die für eine solche Wissensdatenbank notwendigen und zurzeit durchgeführten Entwicklungen umfassen:

- Die Anwendung geeigneter Formalisierungsmethoden, um das extrahierte Wissen speicherfähig und vergleichbar zu machen.
- Das Design einer zweckmäßigen Datenbankstruktur, die in der Lage ist, Informationen dieser Art zu speichern, zu verwalten und wieder zugänglich zu machen.
- Die Entwicklung von Methoden zur Bewertung des gesicherten Wissens, welche in der Folge die Lernfähigkeit der Datenbank, d.h. die Integration neuen Wissens bzw. das Verwerfen nicht mehr gültigen Wissens, gewährleistet.

Durch die Anwendung der entwickelten Methodik auf bereits vorliegende Klassifikationsergebnisse ist eine Datenbank aufzubauen, die einen Grundstock an Erfahrung umfasst und zur weiteren Kalibrierung von IMALYS dient.

Zudem ist es notwendig, den Arbeitsprozess von IMALYS in ein GI-System zu integrieren, um damit den zur Bearbeitung komplexer Anwendungsfälle notwendigen Bedienkomfort bereitzustellen.



## 5 Zusammenfassung

IMALYS stellt objektorientierte Bildanalysefunktionen bereit, die Zellbildung, die Ableitung von Zellmerkmalen und die Klassifikation anhand von Referenzdaten umfassen. Das dabei von IMALYS verwendete Objektmodell entspricht einer mehrstufigen Abstraktion von Bildinhalten mit dem Ziel der Extraktion und Abgrenzung realer geographischer Objekte aus den untersuchten Fernerkundungsdaten. Dies funktioniert gut für einzelne Szenen. Um während des Klassifikationsvorgangs extrahiertes Wissen über eine bestimmte Objektklasse zu sichern, gegebenenfalls anzupassen und für eine spätere Klassifikation in ähnlichem Kontext verfügbar zu machen, wird zurzeit eine zweckmäßige und lernfähige Datenbankstruktur entwickelt und implementiert. Mit ihrer Unterstützung wird IMALYS eine objektorientierte und datenbankbasierte Klassifikation ermöglichen, die sich durch einen erhöhten Automatisierungsgrad auszeichnet.

## 6 Literaturverzeichnis

- DIAL, G.; BOWEN, H.; GERLACH, F.; GRODECKI, J. & OLESZCZUK, R., 2003: IKONOS satellite, imagery, and products. *Remote Sensing of Environment*, **88** (1-2), S. 23–36
- EISENBEISS, H., 2004: A Mini Unmanned Aerial Vehicle (UAV): System Overview and Image Acquisition. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **36** (5/W1), CD-ROM
- EVERAERTS, J., 2008: The Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVS) for Remote Sensing and Mapping. *International Archivex of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **37** (B1), S. 1187–1192.
- FREIXENET, J.; MUÑOZ, X.; RABA, D.; MARTI, J. & CUFI, X., 2002: Yet Another Survey on Image Segmentation: Region and Boundary Information Integration. *Proc. 7th European Conference on Computer Vision (ECCV)*, Berlin, S. 408–422.
- FU, K. S. & MUI, J., 1981: A survey on image segmentation. *Pattern Recognition*, **13** (1), S. 3–16.
- KRALISCH, S.; FLÜGEL, W.-A.; FINK, M. & BÖHM, B., 2006: Integriertes Landschafts-Managementsystem (ILMS) für Wasserwirtschaft, Kommunal- und Regionalplanung. Friedrich-Schiller-Universität, Jena, <http://ilms.uni-jena.de/>
- LELONG, C. C. D.; BURGER, P.; JUBELIN, G.; ROUX, B.; LABBÉ, S. & BARET, F., 2008: Assessment of Unmanned Aerial Vehicles Imagery for Quantitative Monitoring of Wheat Crop in Small Plots. *Sensors*, **8** (5), S. 3557–3585.
- PAL, N. R. & PAL, S. K., 1993: A review on image segmentation techniques. *Pattern Recognition*, **26** (9), S. 1277–1294.
- SCHOWENGERDT, R. A., 2007: *Remote Sensing – Models and Methods for Image Processing*. Elsevier, Amsterdam, S. 146–147.
- REINHOLD, M.; SELSAM, P. & MATEJKA E., 2008: A software tool for object based image analysis and the evaluation of its segmentation capabilities. *Proc. EARSeL Joint Workshop on New Challenges of High Resolution*, Bochum, CD-ROM
- TOUTIN, T. & CHENG, P., 2002: QuickBird – A Milestone For High Resolution Mapping. *Earth Observation Magazine*, **11** (4), S. 14–18.

# Lokalisierung von Schrift in komplexer Umgebung

KARL-HEINZ STEINKE<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Das Forschungsprojekt „Herbar Digital“ startete 2007 mit dem Ziel der Digitalisierung des Bestands von mehr als 3,5 Millionen getrockneter Pflanzen bzw. Pflanzenteile auf Papierbögen (Herbarbelege) des Botanischen Museums Berlin. Die Aufgabe des Autors ist die Analyse der hochaufgelösten Bilder mit 10400 Zeilen und 7500 Spalten. Die Herbarbelege können außerdem unterschiedliche Objekte enthalten wie Umschläge mit zusätzlichen Pflanzenteilen, gedruckte oder handgeschriebene Etiketten, Farbtabelle, Maßstäbe, Stempel, Barcodes, farbige „Typus-Etiketten“ und handschriftliche Anmerkungen direkt auf dem Beleg. Die schriftlichen Anmerkungen, insbesondere in Handschrift, sind von besonderem Interesse. Kommerzielle OCR-Software kann oftmals Schrift in komplexen Umgebungen nicht lokalisieren, wie sie häufig auf dem Herbarbelegen vorliegt, auf denen Schrift zwischen Blättern, Wurzeln und anderen Objekten angeordnet ist. Im Folgenden wird eine Methode vorgestellt, die es ermöglicht, Schriftpassagen im Bild automatisch zu finden.*

## 1 Einleitung

Kommerzielle OCR-Programme wie z.B. Finereader 9.0 oder Omnipage 16 sind in der Lage, hochqualitativen gedruckten Text weitestgehend korrekt zu erkennen. Allerdings gibt es noch erhebliche Defizite, Texte in komplexen Dokumenten mit eingebetteten Bilddaten oder mit anderen Objekten korrekt zu verarbeiten. Die vorliegenden Herbarien stellen eine komplexe Umgebung für die verschiedenen Texte (Druck- und Handschriften) dar, außerdem sind zusätzliche Objekte vorhanden wie Stempel, Barcode, Maßstäbe, Farbtafeln, Tüten usw., die es sehr schwierig machen, Textstellen im Bild zu lokalisieren. In der Literatur gibt es einige Ansätze, Texte in Bildern zu lokalisieren, wie z.B. auf Buchumschlägen, Scheckformularen, in farbigen Anzeigen, Videobildern, Internetbildern oder allgemeinen Farbbildern, die autonome Roboter mit ihrer Videokamera aufnehmen. In den meisten Fällen handelt es sich dabei um Druckschrift, die erkannt werden soll. Bei den vorliegenden Herbarien stellt jedoch das Gemisch von Handschriften unterschiedlicher Schreiber, Druckschrift in unterschiedlichen Größen und Formen, gestapeltem Text und Barcodeinformationen eine besondere Herausforderung dar.

## 2 Beschreibung der Methode

Das Originalfarbbild (siehe Abb. 2) mit 600 dpi wird auf ein Grauwertbild mit 150 dpi reduziert, um die Rechenzeit in einem vertretbaren Rahmen zu halten. Es wird ausgegangen von horizontal geschriebenen Texten mit nur einer geringen Abweichung von maximal 10 Grad von der Horizontalen. Um Schriftpassagen im Bild automatisch zu finden, muss man sich die Eigenschaften von Schrift zunutze machen. Handschrift besteht im Wesentlichen aus

1) Karl-Heinz Steinke, Fachhochschule Hannover, Ricklinger Stadtweg 120, 30459 Hannover;  
E-Mail: [karl-heinz.steinke@fh-hannover.de](mailto:karl-heinz.steinke@fh-hannover.de)

Tab. 1: Sobeloperator

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

Auf- und Abwärtsbewegungen, die sich von links nach rechts in einer Schreibzeile fortbewegen. Die entstehenden vertikalen Linien lassen sich gut mit dem Sobeloperator (siehe Tab. 1) durch Faltung des Bildes mit einem 3\*3 Fenster gewinnen. Der Sobeloperator kombiniert Gaußsche Weichzeichnung und partielle Ableitung nach  $x$ , so dass das Ergebnis einigermaßen robust gegenüber Rauschen ist (siehe Abb. 3). Durch die Sobel-Filterung wird zusammenhängende Handschrift und Druckschrift zerlegt in kleine nahezu vertikale Schriftsegmente, die mit ihrer Schräglage gut die Schriftneigung wiedergeben.

Tab. 2: Ablaufdiagramm der Methode



Um die Segmente deutlich vom Hintergrund abzuheben, wird eine Kontrastverstärkung mit anschließender Binarisierung durchgeführt. Man erhält vertikal ausgerichtete Linienelemente, deren Konturen berechnet werden (siehe Abb. 4). Um die Merkmale der Objekte nämlich

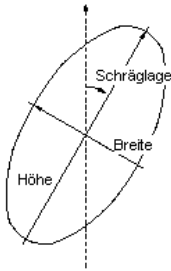


Abb. 1: Ellipsenparameter

Höhe, Breite, Winkel und Schwerpunkt (x, y), auf einfache Weise zu erhalten, bietet sich eine Ellipsenapproximation nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate an. Die Merkmale der Ellipsen, d.h. Höhe, Breite, Winkel und Schwerpunkt werden für alle Ellipsen berechnet und entsprechen etwa den Merkmalen der Objekte. Wie aus Abb. 5 zu erkennen ist, stellt die Gesamtheit aller Ellipsen unterschiedliche Objekte wie Pflanzenteile, Stempel, Teile der Farbtabellen aber auch Schriftanteile dar. Es sind nun diejenigen Ellipsen herauszufiltern, die Schrift darstellen. Dazu müssen mit heuristischen Methoden aus allen

Objekten nur diejenigen ausgewählt werden, die „Schrifteigenschaften“ besitzen (siehe Tab. 3).



Abb. 2: Originalbild

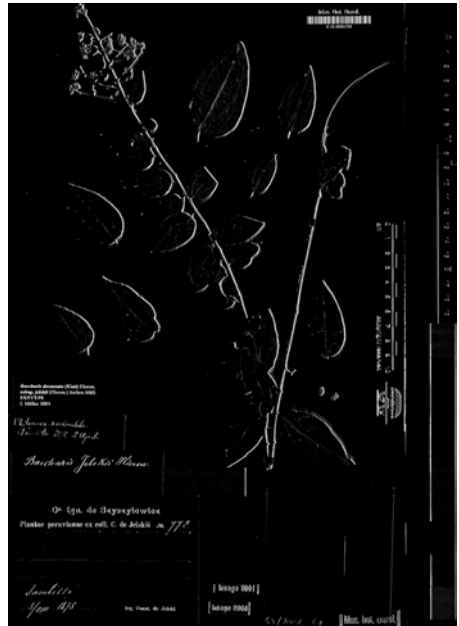


Abb. 3: Sobel-Filterung



Abb. 4: Konturen



Abb. 5: Ellipsenapproximation

Schrift besitzt einen hohen Kontrast und eine horizontale Zeilenstruktur. Wegen der schnellen Abfolge von schwarzen Strichen auf weißem Hintergrund ist insbesondere der horizontale Kontrast besonders ausgeprägt. Unter 2.1 wird ein Verfahren erläutert, um diesen Kontrast für jede Position im Bild zu bestimmen. Zwischen den Schreibzeilen fällt der hohe horizontale Kontrast schnell ab, da der Zeilenzwischenraum fast nur aus weißem Hintergrund besteht. Natürlich sollen die Schriftobjekte eine definierte Höhe besitzen (Schrifthöhe), um als schriftwahrscheinlich zu gelten. Dazu wird ein Bereich definiert, in dem sich die Schrifthöhe bewegen darf. Außerhalb des Bereichs liegende Objekte werden abgelehnt. In einer nahen Umgebung der Objekte soll es „schriftartig“ aussehen, d.h. die Textur hat bestimmte statistische Merkmale. Unter 2.2 wird der statistische Ansatz erläutert, der auch zur Unterscheidung verschiedener Schriftarten beiträgt. Wegen der Zeilenstruktur haben Schriftelemente normalerweise Nachbarn in der gleichen Zeile. Benachbarte Objekte werden zu Schriftzeilen verschmolzen, was durch einen Clusteranalyseansatz unter 2.3 gelingt.

Tab. 3: Eigenschaften von Schrift

<i>Eigenschaften von Schrift</i>
<b>Hoher Kontrast</b>
<b>Zeilenstruktur</b>
<b>Größe im Toleranzbereich</b>
<b>Umgebung ist schriftartig</b>
<b>Nachbarn in gleicher Zeile</b>

## 2.1 Berechnung des Kontrastbildes

Es wird für jeden Bildpunkt in einer quadratischen Umgebung (z.B.  $30 \times 30$ ) der Kontrast berechnet und als Helligkeitswert im Kontrastbild (siehe Abb. 7) dargestellt. Es fällt auf, dass nicht nur die Schriftbereiche im Bild einen hohen Kontrast aufweisen, sondern auch Objekte wie Blattränder, Farbtabellen und Zentimetermaße. Da insbesondere der horizontale Kontrast die Schrift von anderen Objekten unterscheidet, wurde versucht, nur die Umgebung in der Zeile auszuwerten (z.B.  $30 \times 1$ ). Neben einer Einsparung von Rechenzeit zeigt Abb. 8 auch ein verbessertes Ergebnis. In Abb. 9 wird ein noch besseres Ergebnis über einen schnellen Algorithmus erreicht, der die Anzahl der Farbwechsel von hell nach dunkel in einer Zeilenumgebung berechnet. Man erkennt, dass z.B. die Pflanze und die Farbtabelle weitgehend unterdrückt werden und hauptsächlich Schriftbereiche und der Barcode stark in den Vordergrund treten. Die Schriftzeilen machen sich nun als helle Streifen im Bild bemerkbar. So haben helle Bildbereiche in Abb. 9 eine besonders hohe Wahrscheinlichkeit, Schrift zu enthalten. Aus allen Ellipsen werden nur diejenigen ausgewählt, die in hellen Bereichen des Farbwechsel-Kontrastbildes liegen und zusätzlich nach oben und unten ein schneller Abfall der Helligkeit (Zeilenzwischenraum) erfolgt.



Abb. 6: Original



Abb. 7: Kontrast



Abb. 8: Zeilenkontrast

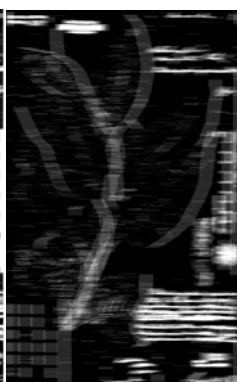


Abb. 9: Farbwechsel

## 2.2 Statistischer Ansatz

Um die Umgebung eines als Schrift in Frage kommenden Objekts zu analysieren, wurde ein statistischer Ansatz gewählt. Zur Texturbeschreibung wird eine Lauflängenverteilung in acht verschiedenen Richtungen (siehe Abb. 10) berechnet, die sich durch das Bildraster ergeben. Die Lauflängen werden in jeder Richtung in 8 Merkmalvektoren einsortiert, so dass sich insgesamt ein Merkmalvektor mit 64 Komponenten ergibt. Mit diesen Merkmalen ist man in der Lage, nicht nur zu erkennen, ob es sich um Schrift handelt oder nicht. Man kann sogar feststellen, ob es sich um Druck- oder Handschrift handelt.

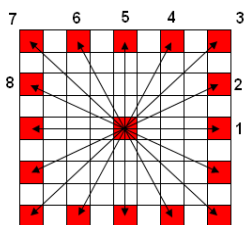


Abb. 10: Acht Richtungen



Abb. 11: Druckschrift



Abb. 12: Handschrift

In einer Lernphase können beispielsweise große und kleine Druckschriften oder verschiedene Handschriften sowie Stempel und Barcodes angelernt werden. In Abb. 17 sind die verschiedenen erkannten Muster unterschiedlich eingefärbt.

## 2.3 Clusteranalyse

Der Clusteranalyseansatz wurde in der Hoffnung gewählt, dass damit Textbereiche gut von Pflanzen und anderen Objekten separiert werden können. Es bietet sich an, die Ellipsen mit ihren 5 Parametern (Höhe, Breite, Winkel, Schwerpunkt(x, y)) als Punkte in einem 5-dimensionalen Vektorraum aufzufassen und zu Punktwolken (Clustern) zusammenzufassen. Die 5 Parameter können mit unterschiedlicher Gewichtung versehen werden. Um zusammenhängende Schrift in ein Cluster zu bekommen, liegt es nahe, die Zeilenähnlichkeit stärker zu gewichten als die Spaltenähnlichkeit. Beim eingesetzten k-means-Algorithmus wird die Anzahl  $k$  von Clustern vor dem Start festgelegt. Wählt man die Clusterzahl gleich der Anzahl der Textbereiche, arbeitet die Clusteranalyse recht gut (siehe Abb. 13). Es ist jedoch unbekannt, wie viele Textstellen im Bild vorhanden sind. Wie in Abb. 14 zu erkennen ist, verläuft die Clusteranalyse nicht zufriedenstellend, wenn die Clusteranzahl nicht mit der Anzahl der Textbereiche übereinstimmt. Beim Experimentieren mit den Gewichtungsfaktoren lagen zusammengehörige Textbereiche oft in unterschiedlichen Clustern oder verschiedene Textbereiche wurden in ein Cluster zusammengefasst. Aus diesem Grund wurde ein eigener, die Zeilenstruktur berücksichtigender Clusteralgorithmus entwickelt. Um die schriftartigen Objekte, die alle gewünschten „Schriftmerkmale“ besitzen, zu Textzeilen zusammenzufassen, versieht man jede Ellipse mit einem Label. Die Labels werden verschmolzen, wenn ihre Ellipsen in einer Zeile dicht

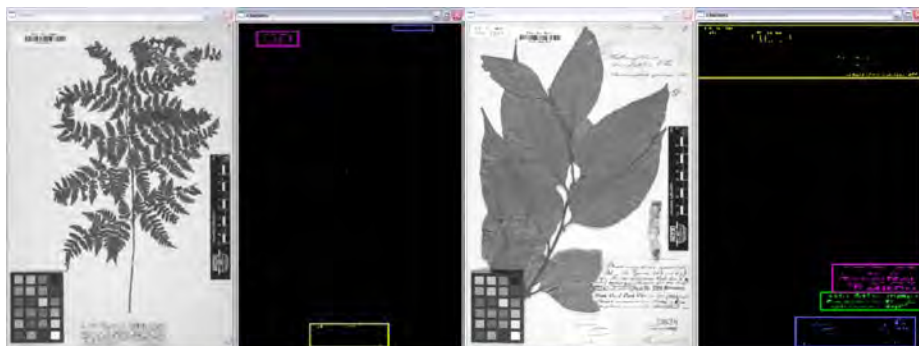


Abb. 13: Clusteranzahl entspricht Textbereichsanzahl

Abb. 14: Clusteranzahl kleiner Textbereichsanzahl

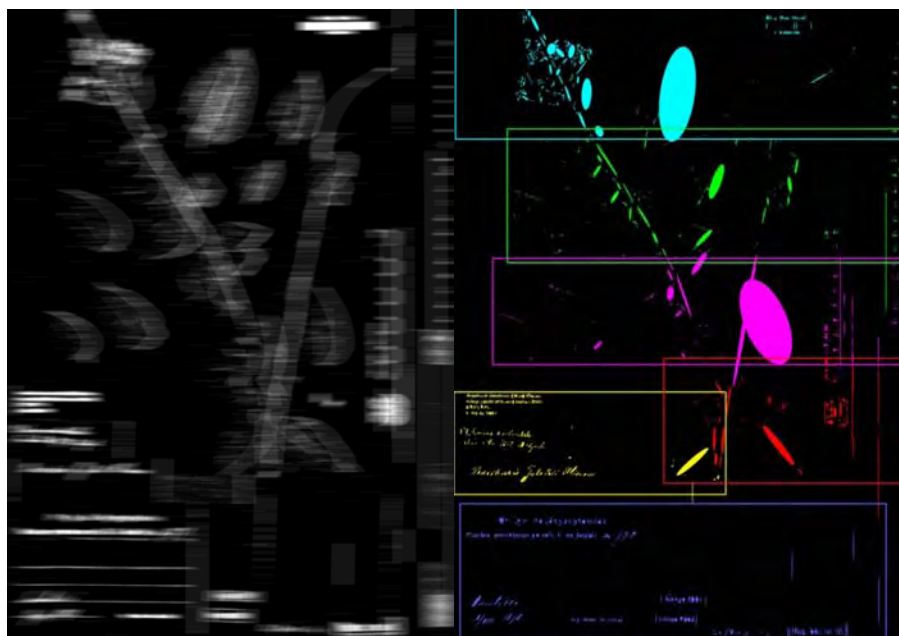


Abb. 15: Kontrastbild über Farbwechsel

Abb. 16: Clusteranalyse



nebeneinander liegen. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis keine Verschmelzungen mehr möglich sind. In diesen Verschmelzungsprozess werden auch zunächst unsichere Kandidaten, die die Eigenschaft „hoher Kontrast“ nicht erfüllten, mit einbezogen. Auf diese Weise werden am Ende alle schriftartigen Objekte zu Zeilen verschmolzen, die dann aus dem Bild ausgeschnitten und weiter analysiert werden können. Man erkennt in Abb. 17, dass die Pflanze fast komplett herausgefiltert wird und auch die Farbtabelle und das Zentimetermaß völlig verschwindet. Übrig bleiben im Wesentlichen nur Druck- und Handschriften, sowie der Barcode und Stempel.

### 3 Ergebnisse und Ausblick

Als Datenmaterial sind 465 Bilder vorhanden mit unterschiedlichsten Pflanzen, gedruckten und maschinengeschriebenen Texten, handschriftlichen Eintragungen von unterschiedlichen



Abb. 17: Schriftzeilen



Abb. 18: Schrift mit Ellipsenanpassung

Schreibern u.a. auch von Alexander von Humboldt, Stempeln usw. Auch in Fällen, in denen hochwertige kommerzielle OCR-Programme Textzeilen nicht lokalisieren konnten, gab das obige Verfahren deutliche Hinweise auf Schriftzeilen. In einigen Fällen wurden allerdings auch

Pflanzenbestandteile, insbesondere horizontal liegende Gräser, als mögliche Textregionen angeben. Solche Fehler treten jedoch auch bei kommerziellen OCR-Programmen auf. So erkannte Omnipage 16 ein Pflanzenblatt in einem Bild als geschriebenen Text. Insgesamt können Fehler unterschiedlicher Art entstehen.

Fehler 1. Art: Schrift wird nicht gefunden

Fehler 2. Art: Nichtschrift wird als Schrift interpretiert

Fehler 3. Art: Schrift wird gefunden, aber falsch gelesen

Das oben angegebene Verfahren kann insbesondere Fehler der 1. und 2. Art verringern. Wenn die Vermutung besteht, dass es sich um Druckschrift handelt (blaue Färbung in Abb. 17), kann die ausgeschnittene Textzeile an eine OCR-Engine weitergereicht werden. Diese bestätigt durch die Erkennungsprozedur die Vermutung oder verwirft sie. Handschriftliche Zeilen können an eine Handschriften- oder Schreibereerkennung weitergeleitet werden, um z.B. den Autor der Schrift zu bestimmen. An Verfahren, die dieses leisten, wird z.Z. mit schon sehr guten Resultaten gearbeitet.

## 4 Literaturverzeichnis

- SOBOTKA, K.; BUNKE, H. & KRONENBERG, H., 1997: Identification of text on colored book and journal covers, Proceedings of the 5. Int. Conference on Document Analysis and Recognition
- KANUNGO, T., 2001: What fraction of images on the web contain text, Proceedings of Web Document Analysis
- WU, V.; MANMATHA, R. & RISEMAN, E. M., 1997: Finding text in images, Proc. ACM Int. Conf. Digital Libraries
- LIENHART, R. & STUBER, F., 1996: Automatic text recognition in digital videos, Proceedings of the SPIE Image and Video Processing IV
- CHEN, X. & YUILLE, A., 2004: Detecting and Reading Text in Natural Scenes, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition
- STEINKE, K.-H., 1981: Recognition of Writers by Handwriting Images; Conference on Pattern Recognition, 1980, Oxford, published in Pattern Recognition 1981; M. Duff Ed.
- STEINKE, K.-H.; DZIDO, R.; GEHRKE, M. & PRÄTEL, K., 2008: Feature recognition for herbarium specimens (Herbar-Digital), Proceedings of TDWG, Perth



## Contribution of remote sensing and GIS to the qualitative assessment of eroded surfaces in the main Ethiopian rift

MONCEF BOUAZIZ<sup>1</sup>, MATHIAS LEIDIG<sup>1</sup>, MALTE KNOCH<sup>1</sup> & RICHARD GLOAGUEN<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Fluviale Bodenerosion stellt in Äthiopien ein ernsthaftes und grundlegendes Problem dar. Der Abfluss zeichnet sich dort vielfach durch eine sehr hohe Sedimentlast aus. Dementsprechend kommt der Modellierung des Erosionsrisikos eine hohe Bedeutung zu. Diese Studie integriert verschiedene Fernerkundungsmethoden und ein Geographisches Informationssystem (GIS), um das Erosionsrisiko hierarchisch nach Schweregrad zu klassifizieren. Dabei sollen Niederschlagsdaten der Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), Hangneigungswinkel die mittels der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) gewonnen wurden, eine Landnutzungsklassifikation, die auf Grundlage von LANDSAT ETM+ Daten erstellt wurde sowie die FAO Bodenkarte verwendet werden. Das Erosionsrisiko als Kombination der vier Faktoren Niederschlag, Landnutzung, Hangneigung und Bodenart soll kontinuierlich mit Hilfe eines „cross- Tab“ Modells bestimmt werden.*

### 1 Introduction

Soil erosion occurs under diverse circumstances and enforces various impacts on soil features, crops and water resources across the world. The main consequences of these dynamic and complex processes of land degradation are loss of precious soil resources for cultivation, siltation of reservoirs and natural streams (KOTHYARI, 1996; BISWAS *et al.*, 1999; JAIN & DOLEZAL, 2000). Causes for soil erosion are often the increasing population, deforestation, land cultivation, uncontrolled grazing and higher demands for fire wood (REUSING *et al.*, 2000).

There are several soil erosion models and methods which have been developed to assess or to predict the erosion using a qualitative or quantitative approaches, such as the universal soil loss equation (USLE), the revised universal soil loss equation (RUSLE), Soil Erosion Risk Assessment Model ICONA, agricultural non-point source pollution model (AGNPS), areal nonpoint source watershed environment response simulation (ANSWERS), chemicals runoff and erosion from agricultural management systems (CREAMS), European Soil Erosion Model (EUROSEM), Water Erosion Prediction Project (WEPP), ([http://soilerosion.net/doc/models\\_menu.html](http://soilerosion.net/doc/models_menu.html)). In the present study, analysis of remotely sensed data combined with a geographic information system (GIS) has been carried out to provide a qualitative erosion risk map, according to hierarchical orders of severity.

### 2 Description of the region

The catchment area studied (MELKA WAKENA) is located in the southern Ethiopian Plateau in the northeast of Africa between the Longitude 38° and 40° and a Latitude varying between 6° and 7,5° North (Figure1). Melka Wakena was selected as a typical catchment covering an area of 4485 km<sup>2</sup>. The area is used intensively for agriculture and has a hydropower dam producing 153 megawatts (1989) with a storage capacity of 760 million m<sup>3</sup>. The region can be classified as sub-humid tropical environment with an average annual rainfall of 853 mm. The average elevation is

about 2608 m a.s.l. Soil erosion which enforces various impacts on irrigation areas, soil features and water resources severely affects the study area.

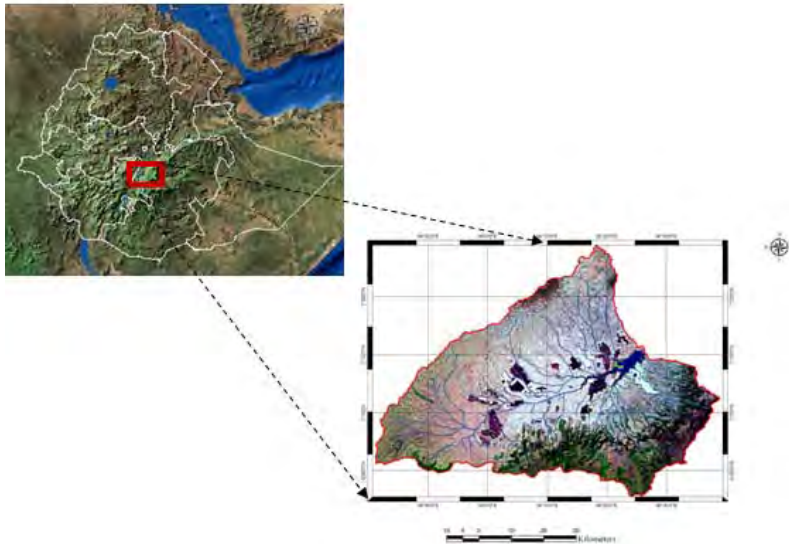


Fig. 1: Location of the study area

### 3 Methodology and results

#### 3.1 Methodology

Several models and approaches have been developed to address the problems of erosion (e.g. MOORE *et al.*, 1993 ; BISHR & RADWAN, 1995 ; GESSLER *et al.*, 1995 ; HILL *et al.*, 1995; MITASOVA *et al.*, 1996 ; THORNES *et al.*, 1996).

In order to assess the erosion risk for MELKA WAKENA reservoir and its upper catchment area a methodological framework in the context of Remote Sensing and Geographical Information Systems (GIS) techniques was considered in this research.

A qualitative assessment of the erosion was made based on the major factor affecting the erosion (rainfall, land use, slope and soil properties). The methodology adapted is a combination of ICONA model, developed by the Nature Conservation Institute of Spain and the Qualitative Erosion Risk Mapping QUERIM model, developed by VRIELING (2003) from the Wageningen University Netherland. Those models are used worldwide (EU countries, Mediterranean states and some African countries Like Tanzania and Tunisia) in an attempt to define the potential of erosion and terrain susceptibility to land degradation.

A modelling study has been carried out for this purpose, which is presented in Figure 2.

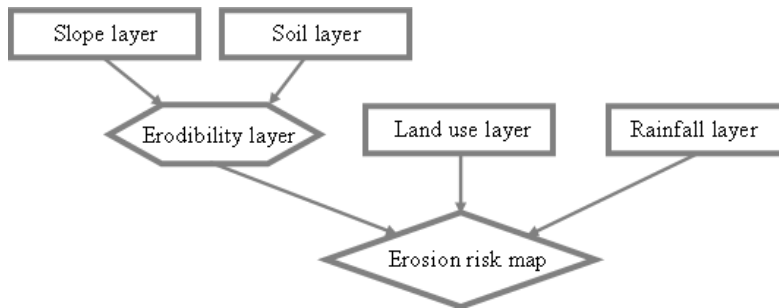


Fig. 2: Flow diagram of the study

A Digital Elevation Model (DEM) from Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) data, the Soil Map of the world provided by the Food and Agriculture Organization (FAO) and a Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM+) scene were used for the presented model. This method consists of predictive, descriptive and integration phases (Ü. BAYRAMUN et. al., 2003). A slope map was generated from a DEM based on SRTM and classified into five groups. Based on the FAO soil map, there are three different soil classes in the study area. Afterwards, the slope layer and the soil layer were combined to produce the erodibility layer. Landsat ETM+ imagery was classified using the Maximum Likelihood Classification (MLC) to determine different land use categories in the study area. Finally, a rainfall intensity layer was generated that was extracted from the TRMM data. Ultimately, we combined the Land use, erodibility and rainfall layer to generate the erosion risk map. In addition to the remote sensing techniques and the GIS, these methods provide a means of integrating expert knowledge to assess and define the sensitivity to erosion.

Superposition and combination of layers in the decision-tree were done by using the cross-tab model.

### 3.2 Results

The determination and assessment of the relative vulnerability of the major responsible factors for soil erosion in this work were presented in following.

#### 3.2.1 Slope map

The topographic feature heavily influences the erosion process. Topography exerts its control on soil properties (MOORE *et al.*, 1993), on microclimate and vegetation distribution (FRANK & ISARD, 1986), and on runoff and moisture availability (MOORE *et al.*, 1991; PICKUP & CHEWINGS, 1996).

In this study, SRTM data was used to create the slope classes. A Slope map was generated from the DEM and classified into 5 classes as presented in the Figure 3.

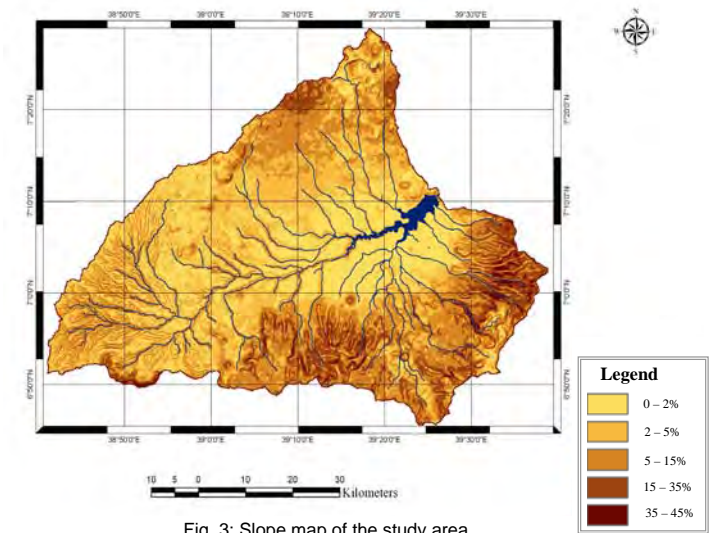


Fig. 3: Slope map of the study area

Tab. 1: Classes of slope in the study area

	Slope classes				
	0 – 2%	2 – 5%	5 – 15%	15 – 35%	35 – 45%
Area (ha)	1254.2	1462	1263.1	408.32	97.37
Area (%)	27.9	32.6	28.2	9.1	2.2

3.2.2 Soil type

The physical properties of soil were provided by the FAO soil map of the world. Several parameters are included in the FAO soil map data such as clay mineralogy, soil depth, soil and terrain suitability for specific crop production, soil moisture, storage capacity and soil drainage class. Three classes of soil characterize the investigation area (Eutric Nitisols, Plinthic Ferralsols, Ferric Acrisols). The sensibility to erosion was evaluated according to parameters described above, the database and references (MAJALIWA, 2003) provided by the FAO.

Tab. 2: Area of the different soil type

	Soil type		
	Eutric Nitisols	Plinthic Ferralsols	Ferric Acrisols
Area (Km <sup>2</sup> )	2279	1303	903
Area (%)	50.8	29.1	20.1

### 3.2.3 Land use

The Landsat-7 ETM+ image used in this study, was acquired on 2 February 2000, the image had no clouds within the study area. A supervised Maximum Likelihood Classification (MLC) was performed on this image. The resulting land use classes are tabulated in the Table 3 and the map presented in Figure 4.

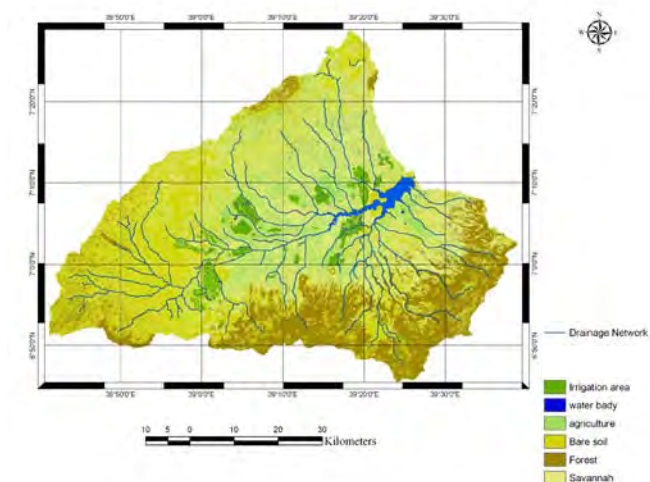


Fig. 4: Land use types of the study area

Tab. 3: Area of land use in the study area

	Types of land use					
	<i>Irrigation area</i>	<i>Agriculture</i>	<i>Bare soil</i>	<i>Savannah</i>	<i>Forest</i>	<i>Water body</i>
<i>Area (ha)</i>	203.2	588.6	1462.52	1299.6	852.28	78.8
<i>Area (%)</i>	4.53	13.12	32.61	28.98	19	1.75

### 3.2.4 Rainfall

The amount of rainfall affecting the study area was obtained from TRMM data. Precipitation displays small-scale of variability that requires frequent, closely spaced observations for an adequate representation. Such observations are not possible for whole globe or hardly accessible areas - when depending only on surface based measurements (LEIDIG et al). Consequently observations depend on a variety of satellites to estimate precipitation on a global basis (HUFFMANN et al., 2006 and HONG et al., 2006). One of these possibilities is to analyse the data sets based on the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), which provide a calibration-



based scheme for combining precipitation estimates from multiple satellites at fine scales. In the presented investigation area the mean annual precipitation varies between 628 mm and 1079 mm, according to the TRMM data sets. The maximum amounts can be identified in the center of the study area, while lowest precipitation can be found in the North and East of the investigated area.

### 3.2.5 Erosion risk map

The erosion risk map was generated by combining the soil erodibility map and erosion sensibility map. Soil erosion risk map is presented in Figure 5. Four classes characterize this map, where the severity of the erosion risk varying from low to very high erosion risk.

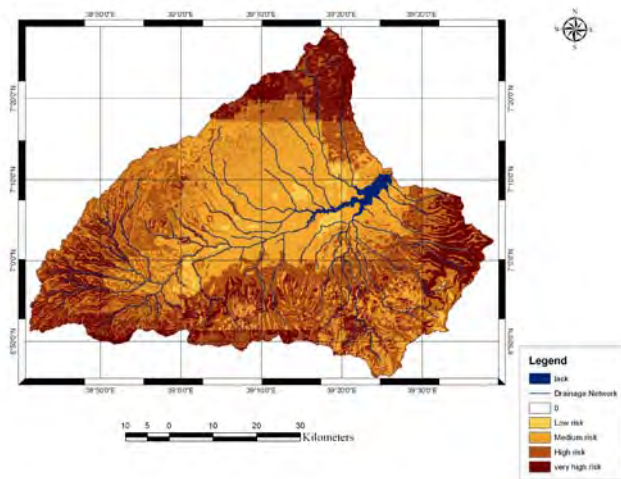


Fig. 5: Soil erosion risk map

Tab. 4: Distribution of the soil erosion risk classes

	Erosion risk map			
	Low risk	Medium risk	High risk	Very high risk
Area (Km <sup>2</sup> )	224.8	1892.6	1580.2	787.4
Area (%)	5	42.2	35.2	17.6

From the erosion risk map elaborated, it can be noted that approximately half of the study area has a high to very high risk of erosion. Low risk of erosion can be found in only 5 % of the whole investigation area. These areas are located especially around the reservoir and the central part of the watershed.

## 4 Conclusion

Land use, topography of the region, rainfall and soil properties are the most likely factors that affect soil erosion. In this study, all of these controlling factors are analyzed and evaluated using the techniques of remote sensing and GIS. The interpretation of the results obtained from the applied models show us a high to very high risk, which is widely spread in barren lands and rangelands. It can be found especially on steep slopes in the hilly and mountainous areas in the South East and the extreme North of the region. There, where long slopes dominate, there is an urgent need for effective preparedness in order to mitigate severe impacts of the erosion.

The spatial pattern of potential severity to soil erosion is also largely controlled by the soil properties of terrain units. The west of the MELKA WAKENA watershed, where the Ferric Acrisols (higher sensitivity to erosion compared with the other soil types in the region) dominates, presents a high to very high risk of erosion in most parts.

In concert with land use, the spatial differences of the rainfall intensity exerts a strong influence on soil erosion risk, this concept is easily remarkable from the spatial distribution of the high to very high erosion risk (Figure 5).

According to this study, the areas surrounding the vicinity of the reservoirs have a medium erosion risk which allows the development of several agriculture areas in this region. Around MELKA WAKENA reservoir the land use is characterized by a high vegetation land cover and a slope varying from 0 to 5%, which explains the low to medium risk of erosion.

As a synthesis, this work indicates the immediate need for the adoption of proper conservation strategies in the high and very high erosion area in order to control the eutrophications of the South-Ethiopian reservoir and to prevent further area degradation.

The mapping and modeling method followed above is rapid, area-wide, straightforward and principally fed by remote sensing data. It provides a flexible tool, applicable for a wide variety of regions, especially in emerging countries where logistic is difficult and historical time series of in-situ measurements not or scarcely available.

## 5 References

- BAYRAMÜN, Ü.; DENGÜZ, O.; BAKKAN, O. & PARLAK, M., 2003: Soil Erosion Risk Assessment with ICONA Model; Case Study: Beypazarı Area. *Turk J. Agric For* **27** p. 105-116
- BISHR, Y.A. & RADWAN, M.M., 1995: Preliminary design of a decision support system for watershed management. *ITC Journal*, vol. **1**, p. 23-28.
- BISWAS, S.; SUDHAKAR, S. & DESAI, V. R., 1999: Prioritisation of sub-watersheds based on morphometric analysis of drainage basin: a remote sensing and GIS approach. *Indian Soe. Remote Sens.* **27**(3), 155-166.
- FRANK, T.D. & ISARD, S.A., 1986: Alpine vegetation classification using high resolution aerial imagery and topoclimatic index values. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. **52**, no **3**, p. 381-388.
- GESSLER, P.E.; MOORE, I.D.; MCKENZIE, N.J. & RYAN, P.J., 1995: Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes. *International Journal of Geographical Information Systems*, vol. **9**, no **4**, p. 421-432.

- HILL, J.; MÉGIER, J. & MEHL, W., 1995: Land degradation, soil erosion and desertification monitoring in Mediterranean ecosystems. *Remote Sensing Reviews*, vol. **12**, p. 107-130.
- HONG, Y.; ADLER, R.F. & HUFFMANN, G.F., 2006: Evaluation of the potential of NASA multisatellite precipitation analysis in global landslide hazard assessment, *Geophysical Research Letters*, **33** (L22402): 1-5.
- HUFFMANN, G.J.; ADLER, R.F.; BOLVIN, D.T.; GU, G.; NELKIN, E.J.; BOWMAN, K.P.; HONG, Y.; STOCKER, E.F. & WOLF, D.B., 2007: The trmm multisatellite precipitation analysis (tmpa): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales, *Journal of Hydrometeorology*, **8**: 38–55.
- JAIN, S. K. & DOLEZAL, F., 2000: Modeling soil erosion using EPIC supported by GIS, Bohemia, Czech Republic. *J. Environ. Hydrol.* **8** Paper2, p. 1-11
- KOTHVARI, U. C., 1996: Erosion and sedimentation problems in India. In: *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives* (ed. by D. E. Wailing & B. W. Webb) (Proc. Exeter Symp), 531-540. IAHS Publ. no. 236.
- LEIDIG, M. & GLOAGUEN, R., 2008: Fine-resolution erosion estimation on large scale based on remote sensing data - an approach for Tibet and connected regions,” in Conference IEEE proceedings: IGARSS, Boston, Massachusetts (USA).
- MAJALIWA, M.J.G.; MAGUNDA, M.K.; TENYWA, M.M. & ISABIRYE, M., 2003: Effect of topography on soil erodibility in Kakuuto micro-catchment, Uganda. *E. Afr. agric. For. J.* **69**(1) pp. 19-27.
- MITASOVA, H.; HOFIERKA, J.; ZLOCHA, M. & IVERSON, L.R., 1996: Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 10, no **5**, p. 629-641.
- MOORE, I.D.; GRYSO, R.B. & LANDSON, A.R., 1991: Digital terrain modeling: review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, vol. **5**, p. 3-30.
- MOORE, I.D.; GESSLER, P.E.; NIELSON, G.A. & PETERSON, G.A., 1993: Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of America Journal*, vol. **2**, p. 443-452.
- PICKUP, G. & CHEWINGS, V.H., 1996: Correlations between DEM-derived topographic indices and remotely sensed vegetation cover in rangelands. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. **21**, p. 517-529.
- REUSING, M.; SCHNEIDER, T. & AMMER, U., 2000: Modeling soil loss rates in the Ethiopian Highlands by integration of high resolution MOMS-02/D2-stereo-data in a GIS. *Journal of Remote Sensing*, **21**, p. 1885-1896.
- SANJAY, K. J. & GOEL, M. K., 2002: Assessing the vulnerability to soil erosion of the Ukai dam catchments using remote sensing and GIS, *Journal des Sciences Hydrologiques*, **47** 1 p.31–39.
- THORNES, J.B.; SHAO, J.X.; DIAZ, E.; ROLDAN, A.; MCMAHON, M. & HAWKES, J.C., 1996: Testing the MEDALUS hillslope model. *Catena*, vol. **26**, p. 137-160.
- VRIELING, A.; STERK, G. & BEAULIEU, N., 2002: Erosion risk mapping: A methodological case study in the Colombian Eastern Plains. *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. **57** no. 3 pp. 158-163.

# Remote Sensing Analysis of Quaternary Deformation and Landscape Responses Using SRTM Digital Elevation Model for Kabul River Hindukush

SYED AMER MAHMOOD<sup>1</sup>, FAISAL SHAHZAD<sup>1</sup> & RICHARD GLOAGUEN<sup>1</sup>

*Abstract: Several DEM processing techniques were used to monitor the vertical uplift conditions along the Kabul River across Afghanistan and Pakistan border. The Kabul River originates in the central part of the Hindu Kush, about 100 km west of Kabul. It flows eastward through Kabul and Jalalabad and after entering Pakistan, joins the Indus River near Attock, east of Peshawar. It is the only river in Afghanistan that is a tributary to the Indus River System that reaches Indian Ocean. In addition, this region is bounded by principal active zones in the context of India-Eurasia Plate collision. As a result, the uplift and deformation process of this area is accordingly very active. Objectives of this work are to identify neotectonic boundaries and derive absolute uplift rates along Kabul River using power-law scaling relation between channel slope and contributing drainage area to obtain a more detailed picture of the tectonic processes of the study area. Topographic data is provided in form of a SRTM DEM of the working area. Data is cross-checked with the topographic maps. Further analysis comprises automatic extraction of the drainage network and catchment area after eliminating spurious pits and flats using the D8 method. The obtained longitudinal river profiles are evaluated and analyzed to derive concavity and steepness indices. Shaded relief models are calculated and are used as basis for an interactive visual interpretation of terrain models with respect to lineaments. Lineaments are also digitized on screen from slope and aspect. Finally, they are compared to the results of the longitudinal profile analysis. Finally an uplift rate map has been prepared for the study and data analysis shows an inhomogeneous distribution of absolute uplift rates along the Kabul River. Detection and mapping of active tectonic boundaries can be achieved at low cost and results are available rapidly. The results are in accordance with lineaments derived from geomorphological interpretation and seismicity. This method allows for the estimation of deformation over large areas, the localization, and the quantification of vertical displacements. The high resolution DEM can be used to cover small offsets of streams due to tectonic movement, but this study can be improved further by using GPS data and other geophysical and geological means.*

## 1 Introduction

The Kabul river basin is located in eastern Afghanistan, neighboring the Pakistan border. It is 435 miles (700 km) long, of which 350 miles are in Afghanistan. It covers an area of about 88,600 km<sup>2</sup> in eastern Afghanistan and northern Pakistan and varies in elevation from 7,620 m in the Hindukush mountains down to 305 m near Nowshehra (TUNNEMEIER & HOUBEN 2005).

1) Syed Amer Mahmood,

2) Faisal Shahzad,

3) Richard Gloaguen, Remote Sensing Group, Institute of Geology, TU-Bergakademie Freiberg, B.von-Cotta Str. 2, 09599 Freiberg, Germany; E-Mail: [amerpakistan@gmail.com](mailto:amerpakistan@gmail.com)

Rising in the Sanglakh Range 45 miles west of Kabul city, it flows east past Kabul and Jalalabad, north of the Khyber Pass into Pakistan, and past Peshawar; it joins the Indus river northwest of Islamabad. The Kabul River is the primary source of water for the proposed dam at Kalabagh, about 200 km downstream from Tarbela Dam. DEM is significant in geological study in that it is possible to extract much of information quickly and easily prior to embarking on field campaigns. Although many DEM is inexpensive and easily obtained, some of them are suffer low quality such as low resolution and hole depressions. First we remove the holes depressions and pits to make the DEM accurate. We extract drainage network from DEM of the Kabul Basin. This drainage network consists of more than 100 streams and is in the form of stream longitudinal profile and stream area profiles. We analyze these individual stream profile and thus whole drainage network by using stream power law of scaling relation. In this study we are presenting only the main tributaries and excluding small streams. The stream profile analysis helps us to calculate the steepness, concavity and uplift rates of each stream. Spatial distribution of concavity, steepness and uplift rates lead us to prepare their respective maps for the area. Streams in north-west of the drainage basin indicate high steepness and concavity indices as compared to streams in south-east. Spatial distribution of concavity, steepness and uplift rates differentiate between north-west and south-east parts of Kabul River valleys.

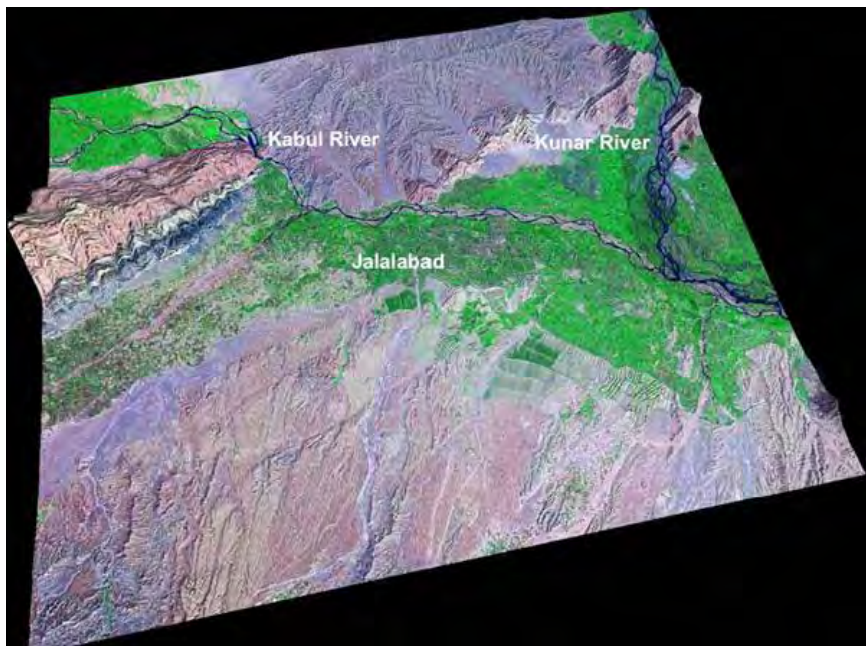


Fig. 1: Landsat of Kabul River Area draped over SRTM

## 2 Geotectonic setting of Kabul River Basin

The Kabul river basin is a basin structure, which arose as a result of plate movements during the Late Palaeocene (Tertiary). It is surrounded and underlain by largely metamorphic rocks (SEARLE et al. 1999). The Kabul basin sediment consists of an accumulation of terrestrial and lacustrine sediments, mainly of Neogene age. Most of these sediments consist of sand and gravel. Geology of a basin plays an important role in the surface behavior and drainage patterns. The map of main rock group distribution in the Kabul river basin shows that most of the areas in the northern part are covered by metamorphic (gneiss, schist, quartzite, and slate) and igneous (granite, granodiorite, and syenite) rocks. The southern part is covered by sedimentary (limestone, travertine, dolomite, sandstone, and marl) rocks. Therefore, rivers which flow in the northern part usually cross metamorphic and igneous rocks. These types of rocks with high resistance usually do not play as an important role on the flow of river pattern. These rocks are part of the Kabul block and are intersected by the Herat Fault and Bamiyan in the west, Sorobi fault in the east and Chaman Fault in the South-East. They are fragmented along the fracture and shear paths and intensely folded and even imbricated in parts.

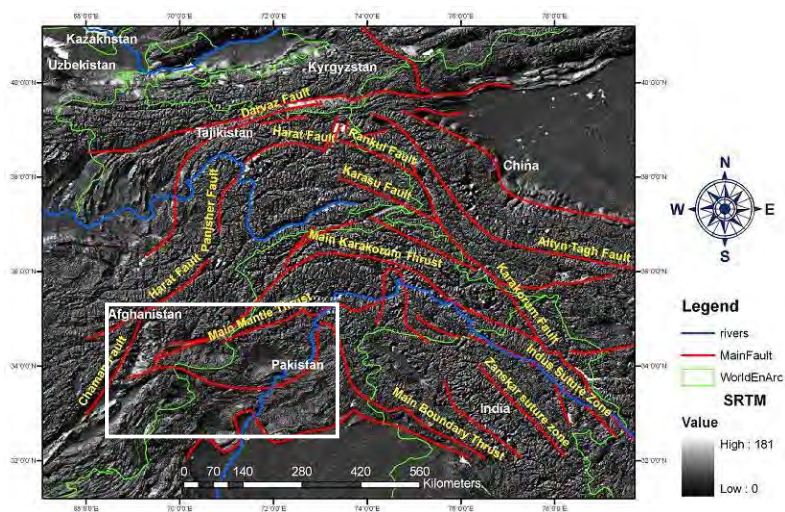


Fig. 2: Geotectonic map of the Study Area showing tectonic terrains and major Cenozoic structures, after TAPPONNIER et al. (1981), BURTMAN & MOLNAR (1993), TRELOAR & IZATT (1993), STRECKER et al. (1995), SCHNEIDER et al. (1999), RUMELHART et al. (1999), YIN et al. (2002), and COWGILL et al. (2003).

### 3 Methods

Remote sensing and DEMs are important tools for understanding the neotectonics of an area. We have applied stream profile analysis on drainage network extracted from SRTM DEM. Modern image processing technique helps us to extract drainage network of the area from DEM. Flow direction is dependent on upslope area and specific catchment area. Stream longitudinal profiles are identified and selected based upon a least cost path analysis which computes the downstream flow path. Individual streams are prepared in ASCII format for further processes. We use moving average filter for smoothening of the streams as they contain some error typically because of interpolation. Stream power law of scaling relations under steady state condition is used to draw area slope profile of all streams (HOWARD & KERBY 1983; O'CALLAGHAN & MARK 1984; HOWARD 1994). Trends are selected from each profile based upon the knickpoints information (MAHMOOD et al. 2008). The concavity and normalised steepness indices are calculated by regression analysis. This drainage network that contributes to Kabul valley has played major role in the formation of present day landscape of Kabul river Basin (HACK 1973; SNYDER et al. 2000; WHIPPLE et al. 2000; KIRBY & WHIPPLE 2001; WAKABAYASHI & SAWYER 2001; SNYDER et al. 2003; BISHOP et al. 2005; WOBUS et al. 2006; SHAHZAD et al. 2007; MAHMOOD et al. 2008 ).

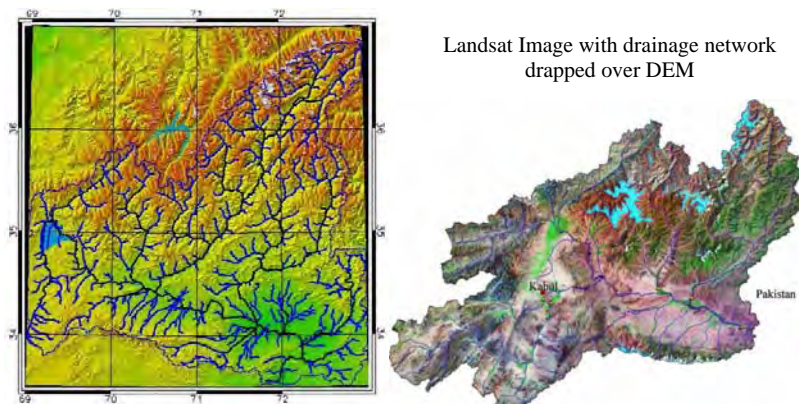


Fig. 4: Drainage Network of Kabul river Valley over Shaded relief Map on left hand side and Landsat image over SRTM DEM on the right hand side.

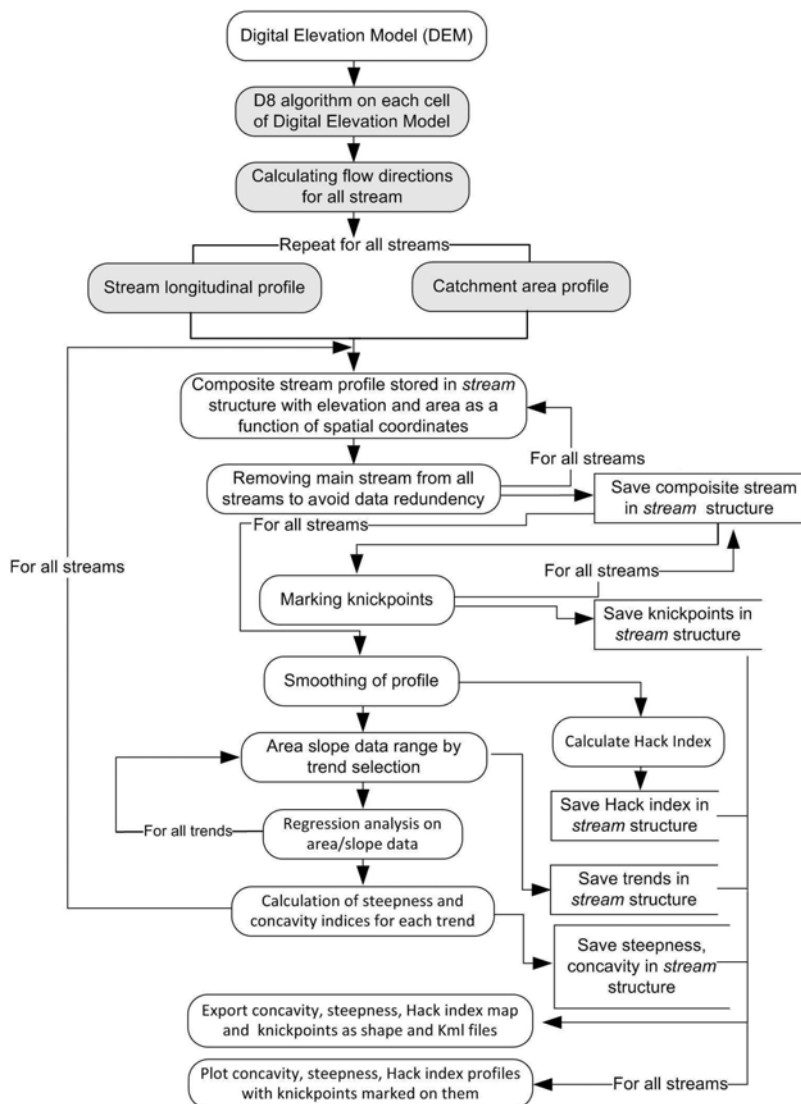


Fig. 4: Data flow diagram showing various digital image processing steps



## 4 Results and discussion

Bedrock incision model provides important information to understand neotectonics of the area. We analyse stream profiles to calculate the concavity and steepness values of their different trends. These values help us not only to understand the individual stream morphology but also the spatial distribution of these values. We analysed 21 main tributaries for stream profiles of the area and observe concavity in the range of 0.29 to 1.8 and steepness in between 18.7 to 241.2. This suggests that variable tectonic changes are occurring in the area. Knickpoints are marked on each stream and they show change in hill slope or lithologies of the area. We observe high uplift conditions in the north eastern and northern part as interpreted from Steepness values of various streams. The Digital Elevation model and the satellite image of the region shows When Kabul river enter north west of Pakistan where it merges with the Indus river, then they flow here through a water gap near attock range. Both rivers respond to the same local base level. The Indus flows near or over the bedrock through the attock range and studies show that this range is experiencing the active bed rock uplift condition. Despite this common and slow rising base level, the stream patterns upstream of the water gap have strong contrast with each other.

The Indus manifests a braided channel pattern while the Kabul behaves as nearly straight channel at a reasonably comparable distance. It shows that the Indus is actively aggrading in response to the local rising base level, while the Kabul River is incising its bedrock. This is due to the fact, that linear trend to the south of the Kabul River as shown the Landsat image and shaded relief map in the above figures delineate active transpressional faults. The zone of the uplift appears to cross the Kabul River towards the northeast. Kabul River is incising throughout the uplift reach. Just upstream of this local zone, the river exhibits meanders and swampy regions that indicate low gradients. This shows that the Kabul river is ponded upstream of the uplift across it which it incises rapidly and follows straight course and narrow channel shape with the steepest possible slope with stream power.

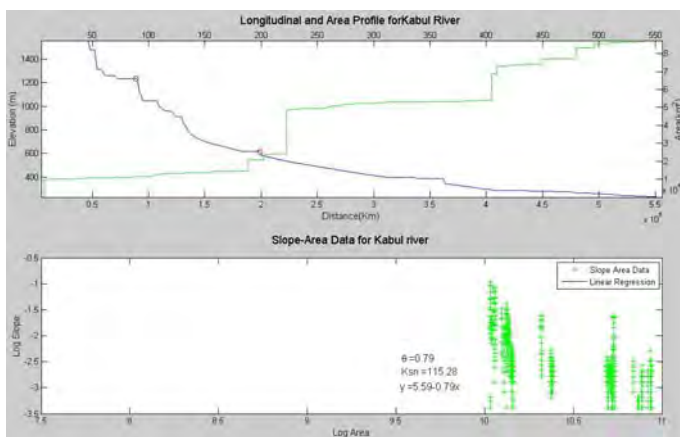


Fig. 5: River Profile and slope Area Plot for Kabul River with Knickpoints

## 5 Conclusion

Digital elevation models permit visualisation of topography and a detailed analysis of topographic data structure than is possible from conventional paper topographic contour maps. DEM is a salient component for computer-based analyses of river profiles and drainage basin extraction as it provides elevation information for the land surface throughout the catchment area. In this study we apply tectonogeomorphological analysis on Kabul River to study its behaviour. The change in the course of this river is mainly due to tectonics and the subsurface lithology of the area. The drainage network of the area continues to develop with the change of tectonics of this region. The concavity and steepness indices values of this area shows high uplift in the north-east and north of the Kabul River because of great structural complexity and ongoing rising of base level rise. Due to the structural complexity it is very important to measure the influence of streams and lineaments on each other. This study can be improved by using high resolution DEMs/GPS data and other geological and geophysical means.

## References

- BISHOP, P.; HOEY, T.B.; JANSEN, J.D. & LEXARTZA ARTZA, I., 2005: Knickpoint recession rate and catchment area: The case of uplifted rivers in Eastern Scotland. *Earth Surface Processes and Landforms*, **30**(6): 767-778.
- HACK, J. T., 1973: Stream-profile analysis and stream-gradient index. U.S. Geological Survey Journal of Research, **1**(4): 421-429.
- HOWARD, A. D., 1994: A detachment-limited model of drainage basin evolution. *Water Resources Research*, **30**(7): 2261-2285.
- KIRBY, E. & WHIPPLE, K., 2001: Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis. *Geology*, **29**(5): 415-418.
- MAHMOOD, S. A.; SHAHZAD, F. & GLOAGUEN, R., 2008: Year: Remote Sensing Analysis of Recent Active Tectonics in Pamir Using Digital Elevation Model; River Profile Approach. IEEE IGARSS 2008, Boston.
- O'CALLAGHAN, J. F. & MARK, D.M., 1984: The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, & Image Processing*, **28**(3): 323-344.
- SEARLE, M. P.; KHAN, M.A.; FRASER, J.E.; GOUGH, S.J. & JAN, M.Q., 1999: The tectonic evolution of the Kohistan-Karakoram collision belt along the Karakoram Highway transect, north Pakistan. *Tectonics*, **18**(6): 929-949.
- SHAHZAD, F.; MAHMOOD, S.A. & GLOAGUEN, R., 2007: Stream profile and neotectonics analysis of Hazara Kashmir Syntaxis using shuttle radar digital elevation data. 3rd IEEE conference on emerging technologies, Pakistan.
- SNYDER, N. P.; WHIPPLE, K.X.; TUCKER, G.E. & MERRITTS, D.J., 2003: Channel response to tectonic forcing: Field analysis of stream morphology and hydrology in the Mendocino triple junction region, northern California. *Geomorphology*, **53**(1-2): 97-127.
- WAKABAYASHI, J. & SAWYER, T.L., 2001: Stream incision, tectonics, uplift, and evolution of topography of the Sierra Nevada, California. *Journal of Geology*, **109**(5): 539-562.
- WHIPPLE, K. X.; HANCOCK, G.S. & ANDERSON, R.S., 2000: River incision into bedrock: Mechanics and relative efficacy of plucking, abrasion, and cavitations. *Bulletin of the Geological Society of America*, **112**(3): 490-503.

- WOBUS, C.; WHIPPLE, K.; KIRBY, E.; SNYDER, N.; JOHNSON, J.; SPYROPOLOU, K.; CROSBY, B.T. & SHEEHAN, D., 2006: Tectonics from topography: Procedures, promise and pitfalls. *Tectonics, Climate and Landscape Evolution*, **398**: 55-74.

# Improvement on Lithologic Classification of remote sensing data using Knowledge-Based Classifier in Southwestern Prieska sub-basin, Transvaal Supergroup, South Africa

NA LI<sup>1</sup>, MICHAELA FREI<sup>1</sup> & WLADYSLAW ALTERMANN<sup>1,2</sup>

*Zusammenfassung: Fernerkundungsdaten mit mittlerer räumlicher Auflösung, wie beispielsweise Landsat-TM Daten, werden häufig für geologische und lithologische Klassifikationen benutzt, obwohl die Ergebnisse durch die relativ grobe räumliche und spektrale Auflösung eingeschränkt sind. In diesem Beitrag wurde ein TM Multispektral Bild, ein Hauptachsenbild und ein kombinierter Datensatz von TM und ASTER mit der überwachten Maximum-Likelihood Klassifikation klassifiziert. Die Klassifikationsergebnisse des multispektralen und des Hauptachsenbildes wurden in einem „Wissensbasierten System“ unter Nutzung der geologischen Karte (1:250000) reklassifiziert. Eine detaillierte geologische Geländekarte (1:25000) diente der Überprüfung der Klassifikationsgenauigkeiten. Die Genauigkeit konnte durch die Wissensbasierte Klassifikation von 64,5 % auf 72,7% erhöht werden. Die hier vorgestellte Methode kann die lithologische Kartierung und die Prospektion auf Bodenschätze insbesondere in großen und schwer zugänglichen Gebieten signifikant verbessern.*

## 1 Introduction

Geological remote sensing with multi-spectral satellite imagery is based on the theory that different rock types reflect electromagnetic energy in different ways, permitting for identification of unique or typical spectral characteristics of the rock mineralogy. In recent decades, remote sensing data have been widely used in geology. The readily available and low cost satellite images, such as the Landsat Thematic Mapper (TM) imagery, are utilized in classification processes, especially in generating lithological maps and detecting mineral anomalies in arid and semiarid regions. But actually, Landsat TM image classification was not very successful in geology because of factors like moderate spatial resolution of 30 m and low spectral resolution in seven bands only. Moreover, the boundaries between different rocks are not necessarily distinct and sharp or are obliterated by scree deposits and different kinds of rocks may show similar spectral characteristics, resulting in spectral overlap and misclassification. In recent years, many advanced classification approaches, such as artificial networks, fuzzy-sets, and knowledge-based system, have been widely used for image classification. FRANKLIN & WULDER (2002) assessed land cover classification methods with medium resolution remotely sensed data. Fuzzy classification was used as the most popular approach to overcome the mixed pixel problem (e.g. SHALAN et al., 2003), which was not in this paper's consideration. Object-oriented classification combined with high resolution aerial photographs was used to classify the land cover (e.g. GENELETTI & GORTE, 2003). Additionally, knowledge-based classification incorporating GIS plays an important role because of its capability of managing different sources of data and spatial modelling (STEFANOV, 2001; DANIELS, 2006; LU & WENG, 2006; ALAADDIN, 2008). In the here

1) Dept. Earth & Environmental Sci. LMU, Luisenstr. 37, 80333 München; Email: [lina780505@126.com](mailto:lina780505@126.com)

2) Shandong University of Science and Technology, PRC

discussed approach, traditional MLC was followed by KBS, where the classified images were reclassified according to the criteria detracted from the image and the ancillary data.

Principal component analysis (PCA) is widely used in geology (LOUGHLIN, 1991) as an image processing approach. The first component shows the brightness information, sometimes called albedo. The second and subsequent principal components reflect differences in spectral reflectance among surface materials which depend on mineralogical-chemical characters or other properties, such as surface roughness. Normally, the components 1, 2, 3 were combined in RGB, because the first three components were considered carrying most of the information. Nevertheless, in this paper, the components 4, 3, 2 were combined in RGB, and with this combination, different geological features appear noticeable in different colours.

The official geological map of the study area is available with a coarse scale of 1:250000 (COUNCIL FOR GEOSCIENCES, 1995) and is not elaborate enough for detailed planning and prospection. Thus, a more detailed geological map is necessary for ongoing prospection campaigns, especially incorporating TM image and some other ancillary data sets. In the current study, a knowledge-based system was constructed to perform reclassification, using the spatial information of aerial photographs and the geological map to reclassify the pixels having most probably been misclassified in first supervised classifications.

## 2 Study area and material

The Griqualand West Basin of the Transvaal Supergroup is one of the three structural basins on the Kaapvaal Craton of southern Africa, and it can be further subdivided into the Ghaap Plateau and Prieska sub-basins. The study area (Fig. 1) is located in the southwest of the Griqualand West Basin, in Prieska sub-basin. Its northern boundary comprises of the southern banks of the Orange River in Griqualand West, between Westerberg and Prieska. The oldest rocks in the area consist of granitic basement comprising various intrusive bodies. These are covered with an angular unconformity by lavas of the Ventersdorp Supergroup. The Transvaal Supergroup follows on the lavas with a lacuna of at least 100 million years (ERIKSSON et al. 2006). The Transvaal Supergroup commences with quartzite and lavas, shales, carbonates and two successive banded iron formations (BIF), Kuruman BIF and Griquatown BIF, of Neoproterozoic age, and without noticeable unconformities. Tertiary to Recent sands and scree-alluvial and fluvial deposits cover the Precambrian rocks, which were intruded by a Proterozoic diabase sill and by Mesozoic dikes. The outcropping Neoproterozoic and Paleoproterozoic rocks have been extensively deformed during several events, encompassing up to seven phases between >2500 Ma and 1100 Ma (ALTERMANN & HÄLBICH 1990; 1991). The circa NW-SE striking Doringberg Fault crosses the area under investigation and belongs to the youngest deformation event. In the area between Prieska, Westerberg and Griquatown, stacking of thrust packages particularly in the iron rich Banded Iron Formations, affected the stratigraphy and thickness of various formations (ALTERMANN & HÄLBICH, 1990, 1991). Metamorphic grade in the southwestern Griqualand West Basin reflected by metamorphic petrology and illite crystallinity, decreases from low to very low grade, approximately from the west to the east (ALTERMANN, 1997). The typical Karoo vegetation cover in this arid area, with average rain fall of less than 200 mm per year differs strongly between the seasons, but is usually far below 20%, except of a narrow belt of gallery forests along the Orange River, where it can be very dense. A small test area of about 185 km<sup>2</sup> south of the Orange River between Westerberg and Prieska (Fig.1) was selected, where the TM and ETM images, the general geological map of the scale

1:250000 (COUNCIL FOR GEOSCIENCES, 1995), aerial photographs, and ASTER images are all available. Additionally, detailed field work was carried out in this area between 2002 and 2005, and the geological map at a scale of 1:25000 was compiled by GLAS (2008). The geological map of South Africa 1: 25000, Prieska sheet, has been assembled from several mapping campaigns and completed by information derived from aerial photographs and satellite images (FREI & ALTERMANN, 2006; Aerial photographs, 1983; TM image, 1984; ETM image, 2000). The 1:25000 geological field map was mapped by LMU students over several years of mapping exercises supervised by W. Altermann. In the present contribution, images from different sensors were utilized and different processing methods were performed, and then the accuracy was assessed using the detailed field geological map of this area, aiming to find an effective way to classify the full study area.

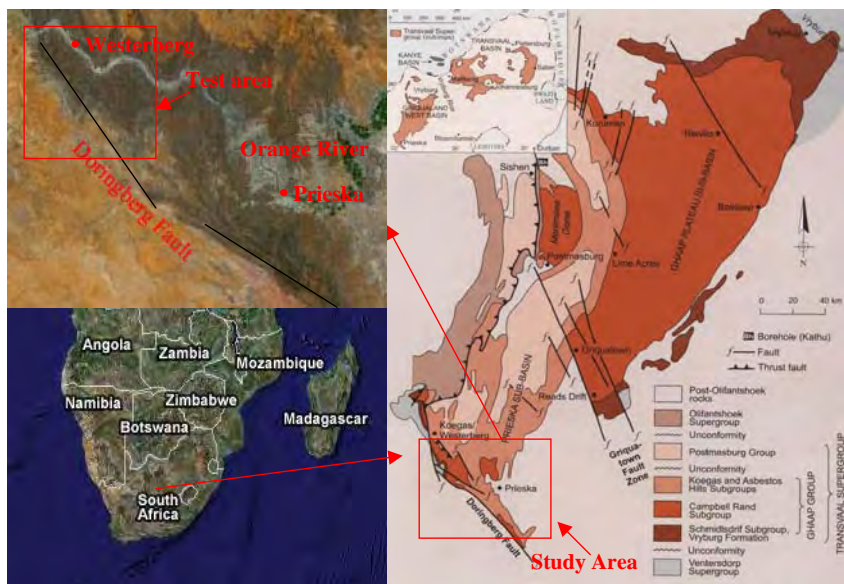


Fig.1: Location of the study area at the south-western margin of the Kaapvaal craton

### 3 Methodology

The processing was performed in four stages, including image pre-processing, supervised classification, misclassified pixel selection, and misclassified pixel reclassification in KBS. The detailed processing techniques are indicated in Figure 2. All the processing was supported by the software ERDAS IMAGINE®.

### 3.1 Data preparation

High quality Landsat TM data of the study area were acquired on 26<sup>th</sup>, May, 1984 and the ASTER image was recorded on 28<sup>th</sup>, March, 2006. Additionally, an ETM image from 2000 and the Geological Map (COUNCIL FOR GEOSCIENCES, 1995) were also available. The ETM image contains record noise but has been rectified to UTM projection and a coordinate system (WGS 84). It was used as basic data to rectify the TM data, the ASTER data, and the scanned geological map (COUNCIL FOR GEOSCIENCES, 1995). Topographic sheets of the area on a scale 1:50000 in digital form and as prints were also available. According to the algorithm optimum index factor (OIF) (CHAVEZ et al., 1984), bands 7, 4, and 1 of the available TM image were combined in RGB. For both TM and ASTER images, atmospheric correction was done over the shadow area by a linear regression (KAUFMAN & SENDRA, 1988). The images were then rectified using a second order polynomial model, resulting in an overall RMS error of less than 1 pixel and check points error less than 0.5 pixels. The geological map was rectified in the same way, but using a first-order polynomial nearest-neighbour transformation and re-projected into the UTM projection zone 34.

To highlight geological features in the TM image, the principal component analysis (PCA) was conducted, based on the input of all reflective channels of Landsat TM and then components 4, 3, 2 were combined in RGB. Evaluation of the spectral profile of the ASTER image has shown that seldom spectral information can be detracted from the short-infrared and mid-infrared bands. The spectral curve in the used data set within this wave range is mostly horizontal and there are no obvious spectral characteristics (eg. band-depth). Thus, the high spatial resolution in visible bands is the only useful information in this data set. For the present purpose, band 2 of the ASTER data, with the spatial resolution of 15 meters, was fused with TM data using the Principle Component algorithm. Meanwhile, the geological map at a scale 1:250000 (COUNCIL FOR GEOSCIENCES, 1995) was digitised, and different rock types were marked with different ID values, to be used as ancillary data in KBS.

### 3.2 Maximum-Likelihood supervised classification (MLC)

In supervised classification, spectral signatures are collected from specified training sites in the image by digitizing various polygons overlaying different rock types. The spectral signatures are then used to classify all pixels in the scene. Signature polygons were selected separately in the multispectral image, PCA image, and fusion image and classification was performed individually using MLC. Then the post-classification was performed to recode the class ID values of each rock type according to the ID values from the geological map, to ensure that in the three classified images and in the digital geological map, the same ID values stand for the same rock types. The pixels covered by shadow areas in images whose class value is 1 were the exception, because there were no corresponding shadow areas in geological map (1:250000; op. cit.).

The classification results of the three data sets were evaluated by comparison to the detailed field geological map (GLAS, 2008). 256 random points were picked individually in the three classified images and the reference map. The accuracy reports were created by comparing the random points' class values in classified images with their values in reference map. The MLC accuracy of the multispectral image, PCA image and fusion image was individually 54.3%, 64.5%, and 53.5%. To ensure the final classification accuracy, the two images with higher MLC accuracy (classified multispectral image and PCA image) were selected and used in the subsequent reclassification in KBS.

### 3.3 Knowledge-based System classification

The knowledge-based system algorithm can be used to reclassify the pixels misclassified in foregoing classified images according to some specific classification standards. In this study, MLC was followed by knowledge-based system classification, based on the geological field map to improve the accuracy of the foregoing MLC process.

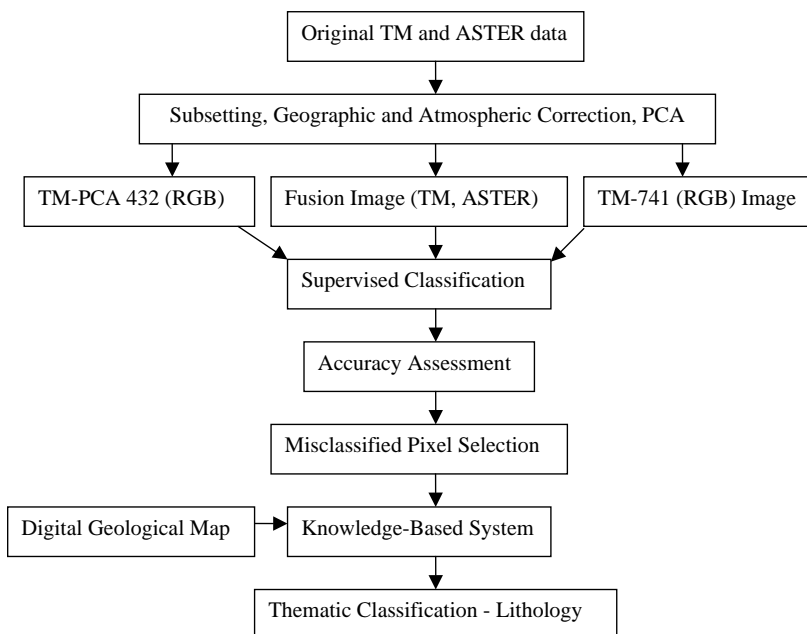


Fig.2: Flowchart of the processing procedure

Disregarding of the mixed pixel problem, the object in the field presented by one pixel in the image should be classified into a specified and fixed lithologic class. So in the two classified images, the corresponding pixels in the same position are expected to belong to the same class after recoding, but actually the results did not coincide, partly because the multispectral image and the PCA image highlight different parts of the spectral information of the rocks, and also because of the misclassification due to the coarse spatial and spectral resolution of the TM data. These pixels needed to be investigated more in detail to analyse the causes for this disagreement. The pixels in the two classified images were placed under two categories. Some corresponding pixels have the same class ID values, and these pixels can be considered to be at a low risk of misclassification, here called consistent pixels. On the contrary, the corresponding pixels classified into different classes with different values have a high risk being misclassified, and were called inconsistent pixels. An algorithm was designed to keep the class values of the consistent pixels and to pick out the inconsistent pixels simultaneously. Then these inconsistent pixels were marked by the same class value (class value = 1) as shadow covered pixels, so that



they can be reclassified together subsequently. The class values of the consistent pixels were kept unchanged in the KBS, ensuring that the accuracy of the reclassified image can not be lower than that from the traditional maximum likelihood classification.

The inconsistent pixels and the shadow areas covered pixels were reclassified together in the KBS, using the geological field map 1:25000 (GLAS, 2008). An algorithm newly developed was then used to replace the pixels whose value is 1 with the ID values in the geological map.

## 4 Results and discussion

The multispectral image and the PCA image (in Fig 3) highlight different parts of the spectral information of the rocks, thus both images together complement each other for the best differentiation for the various lithological units. The TM multispectral image shows the Kuruman banded iron formations (BIF) (A) in dark red colour, and some parts in blue (A1) and cyan (A2), carbonate rocks (B) appear in cyan, the quartzite (C) in light blue and Griquatown BIF (D) appears in red colour along the south bank of the river. The proterozoic diabase sill (E) appears in yellow. In the PCA image, the Kuruman BIF (A) appears in light pink, quartzite (C) in dark pink, carbonates (B) in pale yellow and the Griquatown BIF (D) in distinct green. Proterozoic diabase sill (E) was in light cyan. In addition, some margin parts of the Kuruman BIF, which appear blue or cyan in the multispectral image show distinct orange colour in PCA image (A1-A2).

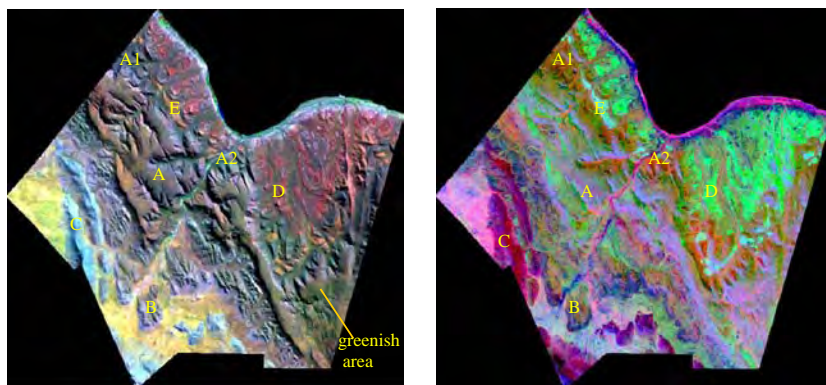


Fig.3: TM Multispectral image (left, bands7, 4, 1 in RGB), PCA image (right, components 4, 3, 2 in RGB)

The MLC accuracy of the multispectral image, PCA image (Fig.4), and fusion image was individually 54.3%, 64.5%, and 53.5%, showing that the ASTER image here was not effective in supporting the classification. MARKHAM & TOWNSHEND (1981) found that image classification accuracy is affected by two factors. The first factor is the negative influence of boundary pixels on classification results; this can be overcome by using a data set with higher spatial resolution. The second factor is that finer spatial resolution in addition increases the spectral-radiometric variation of the rock types. Thus the number of uncertain classified units will increase, and the

final accuracy will decrease. This can explain the decrease in classification accuracy for the fusion image where the spatial resolution was improved by using ASTER data, but the accuracy of the classification did not increase compared to the classification based on TM data alone.

When interpreting the accuracy report resulting from the comparison between classified PCA image and the reference map, it is found that the percentage of correctly classified pixels in the rock type of Griquatown BIF was especially high, with 91%, compared to the multispectral image where is 64%. That is to say, the Griquatown BIF can be recognized and distinguished well in PCA image and this superiority of the PCA image for Griquatown BIF will be adopted in KBS. So in KBS, the individual superiority of the two classified images (Fig.4) was integrated, and the unclassified pixels and the misclassified pixels, were reclassified according to the general geological map (COUNCIL FOR GEOSCIENCES, 1995). Figure 5 shows the image classified via KBS, with a classification accuracy of 72.7%.

Because of the spectral similarity of the investigated rock types, such as the similarity between talus material and carbonate, misclassification can not be avoided if only the spectral characteristics of one set of satellite images are used. For example, in Figure 4, the talus material and gravel around the drainage of the river was misclassified as carbonate. But using KBS, this mistake was overcome (Fig.5), because talus material and carbonate were marked with different ID units in the digital geological map. Besides, the pixels in shadow areas of the satellite images contain no spectral information, belonging to unclassified pixels (shadow in Figure 4), but using the ID values in geological map, they can be given a class value. There are also some small areas, such as the greenish area (marked in the image, Fig. 3), whose detailed lithology should be defined by field work.

## 5 Conclusion

In KBS, the Landsat TM image, combined with the digital geological map, were used to classify the lithology of an arid area bordering the southern bank of the Orange River in Griqualand West, South Africa. The area consists of granitoidic rocks and overlying lavas, quartzite, shales, carbonates and two successive banded iron formations (BIF) of Neoproterozoic and Proterozoic age and Tertiary to recent sands and scree-alluvial deposits. The Precambrian rocks were intruded by a Proterozoic diabase sill and by Mesozoic dikes. A traditional supervised classification was performed to classify the TM multispectral image, the PCA image, and the fusion image (TM and ASTER), and then a knowledge-based system was designed to improve the classification accuracy. The resulting classified thematic image combined the advantages of the TM multispectral image and the PCA image, differentiating for example the Griquatown BIF very well. The method used here is expected to contribute to the generation of a detailed lithologic map in the study area of the southwestern Prieska sub-basin in South Africa. Further more, using this method, geological maps can be updated more easily by implementing the information gained from advanced image processing.

The ASTER image here was not effective for the classification in the test area, although it has considerably improved the spatial resolution to 15 m. In the classification process of TM images, misclassification can not be avoided because the pixels near the edge of two different rock types can not be classified correctly, such as the area between Kuruman BIF and carbonate rocks, between Kuruman BIF and diabase dikes. Spectral similarity, such as between the river sand and carbonate rocks, calcrete and some talus material deposits, or between Kuruman BIF and Griquatown BIF can also cause misclassification.

The algorithm used here, based on the test area was only one of the methods probably suitable for the study area. Other algorithms can be developed during the ongoing project. For example, the textural features detracted from the aerial photographs can be used as ancillary data in KBS. The more information can be combined into a Knowledge Based System in the interpretation process, the better the results of lithologic classification and geological interpretation can be expected. The classification accuracy of these algorithms can be assessed in future research to check if they are effective for the whole study area.

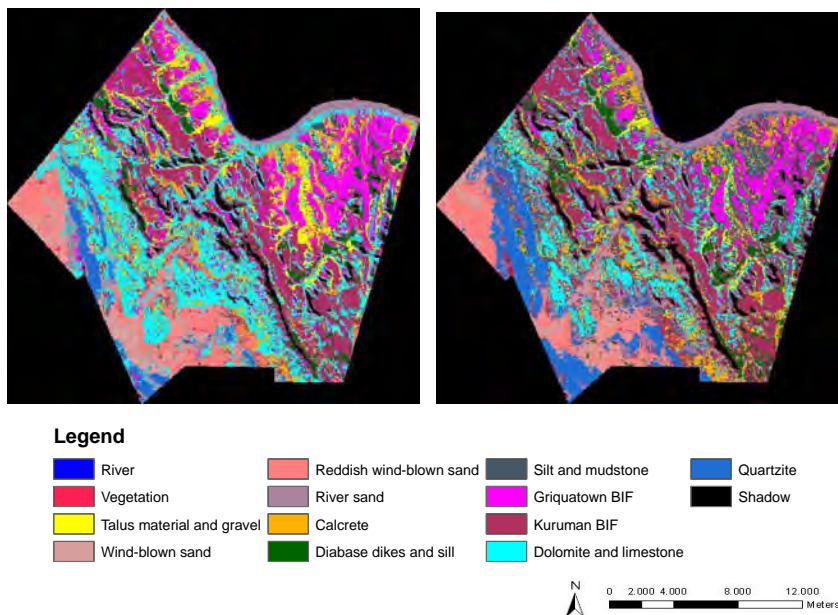


Fig.4: MLC TM multispectral image (left) and PCA image (right)

The information gained by the sensors only reflects the surface condition of the objects, and may often conceal the reality, such as in the case of the greenish parts of the BIF (in Figure 3, left). The green colour may result from the mineralogical composition but may equally be e.g. from the vegetation coverage. Field work is indispensable to explore the detailed conditions. However, remote sensing is superior in obtaining a GIS-based, fast and relatively detailed overview of a large area.

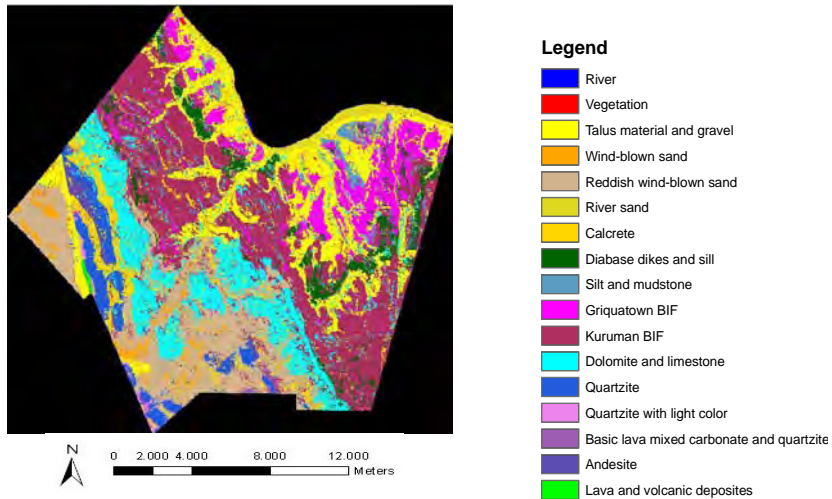


Fig. 5: KBS classified image using MLC and geological map

## 6 References

- ALAADDIN, Y., 2008: Using ASTER Imagery in Land use/cover Classification of Eastern Mediterranean Landscapes According to CORINE Land Cover Project. *Sensor*, **8**, S. 1237-1251.
- ALTERMANN, W. & HÄLBICH, I.W., 1990: Thrusting, Folding and Stratigraphy of the Ghaap Group along the South-western Margin of the Kaapvaal Craton. *S. Afr. J. Geol.*, **93**, S. 553-556.
- ALTERMANN, W., 1997: Sedimentological Evaluation of Pb-Zn Potential of the Precambrian Griquatown Fault Zone in the Northern Cape Province, South Africa- *Mineralium Deposita*, **32/4**, S. 382-391.
- ALTERMANN, W. & HÄLBICH, I.W., 1991: Structural History of the South-western Corner of the Kaapvaal Craton and the Adjacent Namaqua Realm: New observations and reappraisal. - *Precambrian Research*, **52**, S.133-166.
- ASRAR, G., 1989: Theory and Applications of Optical Remote Sensing, S. 402-418.
- ATKINSON, P. M. & Tate, N. J., 1996: Advances in Remote Sensing and GIS Analysis, S. 207-218.
- CHAVEZ, P. S. J.; GUPTILL, C. & BOWEL, J.A., 1984: Image Processing Techniques for Thematic Mapper Data. In: proceeding of the American Society of Photogrammetry Conference, S. 728-752.
- COUNCIL FOR GEOSCIENCES, 1995: Geological Map of South Africa 1:250000, Sheet 2922 Prieska, Geological Survey of South Africa, Pretoria.
- DAI, C. D., 2004: Processing and Analysis of Remote Sensing Image, S. 98-101.

- DANIELS, A. E., 2006: Incorporating Domain Knowledge and Spatial Relationship into Land Cover Classifications: A Rule-based Approach. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. **27**, 14, S. 2949-2975.
- ERIKSSON, P.G.; ALTERMANN, W. & HARTZER, F.J., 2006: The Transvaal Supergroup and Precursors. Chapter 10 In: Johnson, MR., Annhaeusser, CR. Thomas, RJ. (Editors): *The geology of Africa*. Geol. Society of South Africa, S. 237-260.
- ESRI PRESS, 2001: *Getting To Know ArcGIS*.
- FRANKLIN, S. E. & WULDER, M. A., 2002: Remote Sensing Methods in Medium Spatial Resolution Satellite Data Land Cover Classification of Large Area. *Progress in Physical Geography*, **26**, S. 173-205.
- FREI, M. & ALTERMANN, W., 2006: Synergetic Remote Sensing Applications to Address Geoscientific Problems in Africa. 21st CAG, Maputo, Mozambique, 3-6 July, 2006. Abstracts, S. 472-473.
- GENELETTI, D. & GORTE, B. G. H., 2003: A Method for Object-based Land Cover Classification Combining Landsat TM data and Aerial Photographs. *International Journal of Remote Sensing*, **24**, S. 1273-1286.
- GLAS, K., 2008: *Fernerkundung und Geoinformationssysteme zur geologischen Kartenerstellung*, Bachelor Arbeit, LMU.
- KAUFMAN, Y. J. & SENDRA, C., 1988: Algorithm for Automatic Atmospheric Corrections to Visible and Near-IR Satellite imagery. *Int. J. Remote Sens.* **9**, S. 1357-1381.
- LEICA GEOSYSTEMS, GIS and Mapping, 2003: *ERDAS Field Guide*.
- LILLESAND, T. M. & KIEFER, R. W., 1994: Remote Sensing and Image Interpretation, S. 572-577
- LOUGHLIN, W. P., 1991: Principal Component Analysis for Alteration Mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **57**, S. 1163-1169.
- LU, D. & WENG, Q., 2006: A Survey of Image Classification Methods and Techniques for Improving Classification Performance. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. **28**, 5, S. 823-870.
- MARKHAM, B.L. & TOWMSHEND, J. R. G., 1981: Land Cover Classification Accuracy as a Function of Sensor Spatial Resolution. *Proceeding of the 15th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, MI, 11-15 May, S. 1075-1090.
- SHALAN, M. A.; ARORA, M. K. & GHOSH, S. K., 2003: An Evaluation of Fuzzy Classifications from IRS Image: a case study. *International Journal of Remote Sensing*, **24**, S. 3177-3186.
- STEFANOV, W. L., 2001: Monitoring Urban Land Cover Change: An Expert Approach to Land Cover Classification of Semiarid to Arid Urban Centers. *Remote Sensing of Environment*, **77**, S. 173-185.

## Morphometric analysis of Kohat Plateau (Pakistan) using Digital Elevation Models

FAISAL SHAHZAD, SYED AMER MAHMOOD & RICHARD GLOAGUEN

*Abstract: Digital Elevation Models (DEMs) have gained importance in earth sciences after advent of modern space technology. In present study we have utilized DEM from Shuttle Radar topographic mission (SRTM) as a tool for tectonics investigation in Kohat plateau. Kohat plateau forms south western side of Northwestern Himalayan fold and thrust belt (NWHFTB), which is the result of ongoing collision between Indian and Eurasian plate. Main Boundary thrust (MBT) marks northern boundary of this area while Kurram thrust on western side and Indus River is on eastern side. Other important tectonic features of the area are Marwat Thrust, Bhattani Thrust, Pezu Fault and Khisor Thrust. Drainage network of the area has been extracted from DEM as stream longitudinal profiles and catchment area profiles including spatial, area, elevation and length information. These selected streams are contributing to Gambila and Kurram Rivers. A total of 86 streams have been selected for investigation using stream power law and concavity and steepness indices have been calculated. We use these values to study the uplift conditions in the area. Knick points have been identified on all the streams and they help us to study the detailed tectonic features of the area. Our results show high uplift in the Northern and western side while central portion i.e. Bannu basin is comparatively less uplifted. Paleostream analysis helped us to calculate the total incision and vertical displacement along the selected streams.*

### 1 Introduction

Digital Elevation Models (DEMs) have gained importance in earth sciences after advent of modern space technology. In present study we have utilized DEM from Shuttle Radar topographic mission (SRTM) as a tool for tectonics investigation in Kohat plateau. This plateau lies in the Northwestern Himalayan fold and thrust belt (NWHFTB) in Pakistan, which is the result of continuous collision between Indian and Eurasian plate (TAHIRKHELI et al. 1979). This terrain contains many surface and subsurface Seismotectonics features which have high potential for surface deformation and seismic risk. Kohat plateau forms south western side of Northwestern Himalayan fold and thrust belt (NWHFTB), which is the result of ongoing collision between Indian and Eurasian plate. Main Boundary thrust (MBT) marks northern boundary of this area while Kurram thrust on western side and Indus River is on eastern side. Other important tectonic features of the area are Marwat Thrust, Bhattani Thrust, Pezu Fault and Khisor Thrust.

Landscape of the area has evolved as a result of these active features. The surficial tectonic features can be studied in detail from drainage network. We extracted the drainage network from Shuttle radar digital elevation data using different algorithms. The extracted network is in the form of longitudinal stream profile and catchments area profile. These selected streams are

- 1) Remote Sensing Group, Institute of Geology, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Bernhard Von Cotta Strasse-2, 09599, Germany. [geoquaidian@gmail.com](mailto:geoquaidian@gmail.com)

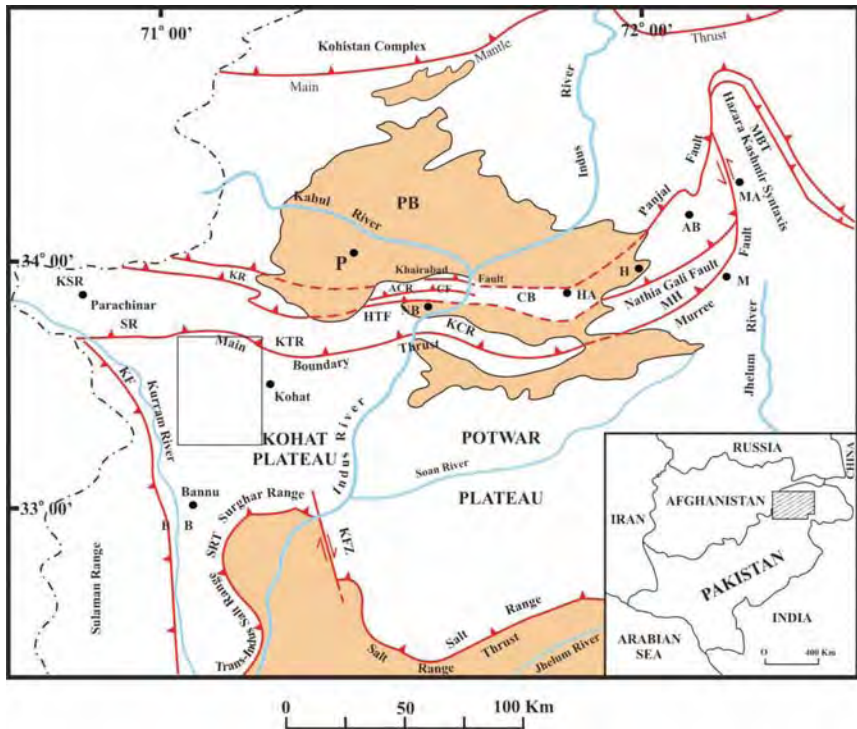


Fig. 1: Tectonic map of Northern Pakistan, showing major structural boundaries. Abbreviations: AB Abbottabad, ACR Attock-Cherat Range, BB Bannu Basin, CB Campbellpore Basin, CF Cherat Fault, H Hassanabdal, HTF Hisartang Fault, KCR Kalachitta Range, KF Kurram Fault, KFZ Kalabagh Fault Zone, KR Khyber Range, KSR Koh-e-Sofaid Range, KTR Kohat Range, M Murree, MA Muzaffarabad, MBT Main Boundary Thrust, MH Margalla Hill Range, NB Nizampur Basin, P Peshawar, PB Peshawar Basin, SR Samana Range, SRT Surghar Range Thrust, Adopted from (SHAH & DIXON 2007).

contributing to Gambila and Kurram Rivers. The final drainage network consists of 86 selected streams. The bedrock incision model is applied on these individual streams to calculate concavity index and steepness indices. These indices are used to morphometric maps of the area (WHIPPLE et al. 1998; KIRBY & WHIPPLE 2001; WOBUS et al. 2006). Knick points have been identified on all the streams and they help us to study the detailed tectonic features of the area.

## 2 Methods Applied

The morphometric analysis of Kohat Plateau in northern Pakistan was carried out for appraisal of surface deformation. We extract drainage network from Shuttle Radar Topography Mission digital elevation data. We apply modern image processing technique i.e. D8 algorithm for this purpose (JENSON & DOMINGUE 1988; SHAHZAD et al. 2007). Stream longitudinal profiles were selected based upon a least cost path analysis which computes the downstream flow path. Drainage network was saved as individual stream files in ASCII format with area and elevation information as a function of spatial location was prepared.

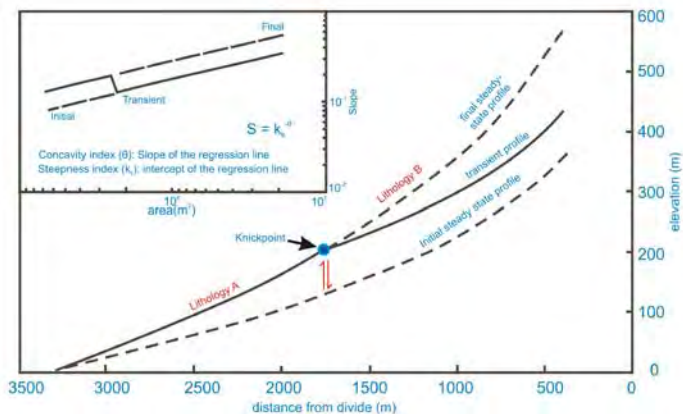


Fig. 2: Transient-state profile between initial low-uplift and final high-uplift zones. The knick zone which is represented by knickpoints migrates upstream as the channel responds to the uplift-rate change. The inset showing the slope vs. drainage area data for the longitudinal profiles represents the variable channel concavity  $\theta$  for both the initial and final profiles, while the steepness,  $k_s$ , is considerably higher for the final profile. This figure is modified from that of (SNYDER et al. 2000).

Area slope profiles of all streams were prepared using bed rock incision model (see figure. 2) under steady state condition (HOWARD & KERBY 1983). Trends are selected from each profile based upon the knickpoints information. We use logarithmic regression analysis to calculate the concavity and normalised steepness indices with reference concavity index equal to 0.45 (SCHOENBOHM et al. 2004; WOBUS et al. 2006). This drainage network contributes to Gambila and Kurram Rives has played major role in the formation of present day landscape of this area (TAHIRKHELI et al. 1979; WHIPPLE et al. 2000; KIRBY & WHIPPLE 2001; JAN et al. 2005; TAHIRKHELI 2005; MONALISA et al. 2007; SHAHZAD et al. 2007).



### 3 Results

We have studied the Kurram River which travels over the Kohat Plateau as shown in figure 1. The extracted 86 streams are located on both sides of the river. We have studied all the streams and main channel by stream power law (see figure 2). The analysis of the main Kurram River is presented here. Stream profile analysis is shown in figure 3. The upper portion of this figure shows that it has three sharp changes represented by knickpoints. The first knickpoint shows the location where it passes over the Samana Range. Though the elevation in this region is not too much high as compared to surrounding regions but the sharp changes in the knickpoints suggest that due to some tectonic processes are increasing the vertical elevation gradient in this portion. The second knickpoint is along some local fault and is also understandable from Hack index profile. This profile observes three trends based on the morphological observation, i.e., an upper segment, middle segment and lower segment. The upper segment travels over relict landscape with low steepness index 39.62 and uniform concavity index 0.51, which mean that they have been less eroded during the recent erosion processes. The middle segment shows intermediate concavity 3.19 and steepness 38.7, which shows that the area has undergone intermediate erosion process or uplift. The lower segment suggests higher concavity and lower steepness indices, i.e., 1.61 and 44.94. Along the downstream of the river, the sudden change in the geomorphic indices shows gradual change in lithology and tectonic activity.

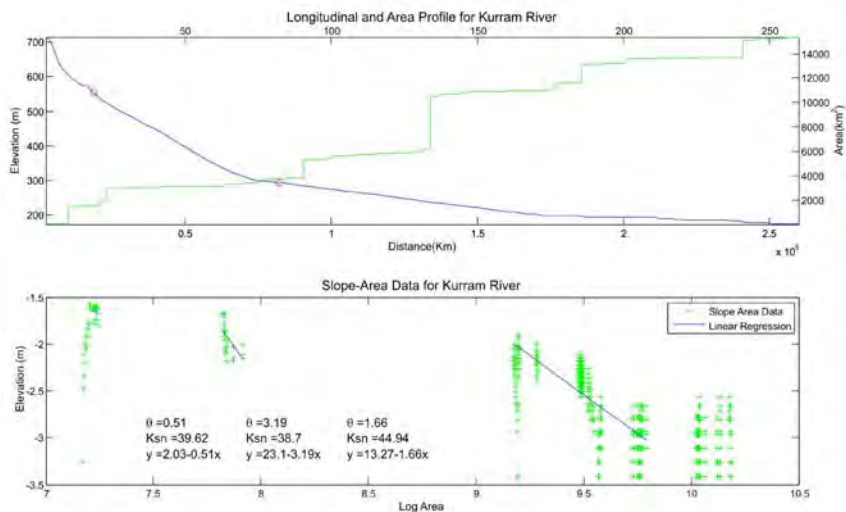


Fig. 3: Stream Profile Analysis of Kurram River in Kohat Plateau

The Hack stream gradient index (HACK 1973) of Kurram River calculated over the contour interval of 150m shows four proper zones of variation. The first and last gradient zones show comparatively low values while the central zones i.e. flow over the main plateau has relatively high values. These values i.e. 149 and 172 show high variation of stream length segment with

respect to elevation. This suggests that the area consists of rugged topography which mainly due to the convergence of Indian plate. Secondly the separation of Samana Range from other areas using Hack index is visible. The first region with low Hack gradient of 77 represents this range.

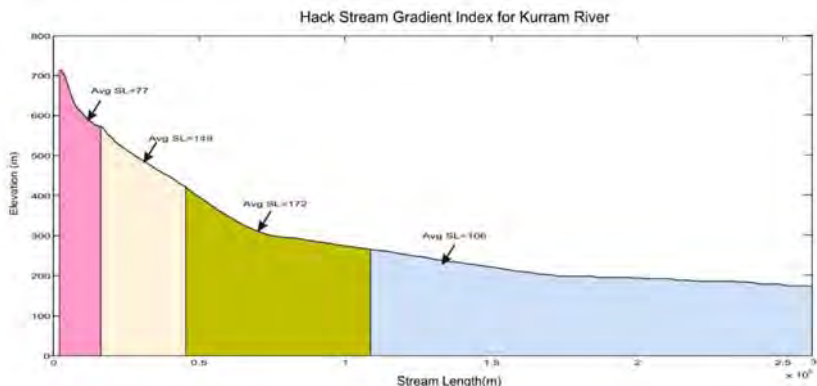


Fig. 4: Hack index profile of Kurram River in Kohat Plateau with a contour interval of 150m

In overall conclusion, we can suggest few things. One, the area consists of rugged topography, secondly the zones of high concavity in the central region i.e. main plateau. This high value is related to the uplift in the region. When this river passes from the Trans-Indus Salt Range this concavity value goes lower and suggest low relative uplift rates.

## Acknowledgment

We acknowledge the financial support from Saxony Government, International Association of Mathematical Geology (IAMG) and Freunde und Förderer der TU Bergakademie Freiberg e. V.

## References

- HACK, J. T., 1973: Stream-profile analysis and stream-gradient index. U.S. Geological Survey Journal of Research, **1**(4): 421-429.
- HOWARD, A. D. & G. KERBY, 1983: Channel changes in badlands. Geological Society of America Bulletin, **94**(6): 739-752.
- JAN, M. Q.; GAETANI, M. & ZANCHI, A., 2005: 32nd International Geological Congress field trip (PR01): A traverse through Himalaya-Karakorum of Pakistan. Episodes, **28**(2): 124-125.
- JENSON, S. K. & DOMINGUE, J.O., 1988: Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, **54**(11): 1593-1600.
- KIRBY, E. & WHIPPLE, K., 2001: Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis. Geology, **29**(5): 415-418.

- MONALISA, A.; KHWAJA, A. & JAN, M.Q., 2007: Seismic hazard assessment of the NW Himalayan fold-and-thrust belt, Pakistan, using probabilistic approach. *Journal of Earthquake Engineering*, **11**(2): 257-301.
- 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. *Bulletin of the Geological Society of America*, **116**(7-8): 895-909.
- SHAH, F. & DIXON, J.M., 2007: Evolution of Fold and Thrust Structures in Kohat Plateau, NW Pakistan.
- SHAHZAD, F.; MAHMOOD, S.A. & GLOAGUEN, R., 2007: Stream profile and neotectonics analysis of Hazara Kashmir Syntaxis using shuttle radar digital elevation data. In 3rd IEEE, International conference on emerging technologies, Pakistan.
- 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. *Bulletin of the Geological Society of America*, **112**(8): 1250-1263.
- TAHIRKHELI, R. A. K., 2005: Earthquake Prone Seismotectonic contours of Hazara-Kashmir terrain. Geological Survey of Pakistan in collaboration with the Japan International Cooperation Agency, Islamabad.
- TAHIRKHELI, R. A.; MATTAUER, K.M.; PROUST, F. & TAPPONNIER, P., 1979: The India Eurasia suture zone in northern Pakistan: Synthesis and interpretation of recent data at plate scale. *Geodynamics of Pakistan*: 125-130.
- WHIPPLE, K. X.; PARKER, G.; PAOLA, C. & MOHRIG, D., 1998: Channel dynamics, sediment transport, and the slope of alluvial fans: Experimental study. *Journal of Geology*, **106**(6): 677-693.
- WHIPPLE, K. X.; SNYDER, N.P. & DOLLENMAYER, K., 2000: Rates and processes of bedrock incision by the Upper Ukak River since the 1912 Novarupta ash flow in the Valley of Ten Thousands Smokes, Alaska. *Geology*, **28**(9): 835-838.
- WOBUS, C.; WHIPPLE, K.; KIRBY, E.; SNYDER, N.; JOHNSON, J.; SPYROPOLOU, K.; CROSBY, B.T. & SHEEHAN, D., 2006: Tectonics from topography: Procedures, promise and pitfalls. *Tectonics, Climate and Landscape Evolution*, GSA Special Paper: 398.

# Multi Source Remotely Sensed Data for Land Cover Classification and Biomass Estimation using Non Linear Methods

ARIEF WIJAYA<sup>1,2</sup> & RICHARD GLOAGUEN<sup>1</sup>

*Abstract: Remote Sensing is useful for different applications including for forest management. This work describes the application of remote sensing data and techniques for supporting sustainable forest management. Landsat 7 ETM+ data was used to classify land cover and to estimate forest biomass. Image classification was conducted applying spectral values and texture data calculated using Geostatistics which were applied for complex land cover of a tropical forest. We used non linear techniques, i.e. Support Vector Machine (SVM) and Multi layer Neural Networks for the classification. The second part of the study estimated stem volume per hectare using variations of number of stems data, spectral values, DEM and vegetation indices as predictors. Multi layer neural networks trained using Levenberg Marquardt algorithm was used to estimate the stem volume. The predicted results were used to estimate above ground forest biomass using available stem volume–biomass equations. The biomass estimates were mapped over the study area using Kriging method and the error of estimate was assessed. Effectiveness and accuracy of the classified image and biomass estimate were assessed using field measurement data and/or previous studies results. We found the estimate results were reasonable and our approach may be applied for land cover classification and biomass mapping over large forest areas.*

## 1 Deforestation in Indonesia

Indonesia, one of the largest tropical forests after the Amazonian in Brazil and tropical rainforest of Congo represents 10% of remaining tropical forests in the world (FAO, 2003). With total terrestrial areas of 187.91 million hectares, Ministry of Forestry (MoF) noted that 133.7 million hectares or more than 50% terrestrial areas in Indonesia were designated as forests (MoF, 2002). These areas do not include inland water ecosystems which cover 3.4 million hectares.

Compared to other South East Asian Countries, Indonesia has the highest deforestation rate. There were about 1.87 million ha/year of Indonesian forests deforested from 1985 to 1997. From 2000 to 2005, Indonesian ministry of forestry found that the deforestation rate were more than 1 million ha/year, whereas in 2002 – 2003 the deforestation rate reached of more than 1.9 million ha (MoF, 2002).

---

<sup>1</sup> Sensing Group, Institute for Geology, TU-Bergakademie, B. von-Cottastr. 2, 09599 Freiberg, Germany

<sup>2</sup> Faculty of Agricultural Technology, Gadjah Mada University, Jl. Sosio Yustisia 1, Bulaksumur, Yogyakarta, 55281, Indonesia, Corresponding Author. Email : Arief.Wijaya@student.tu-freiberg.de

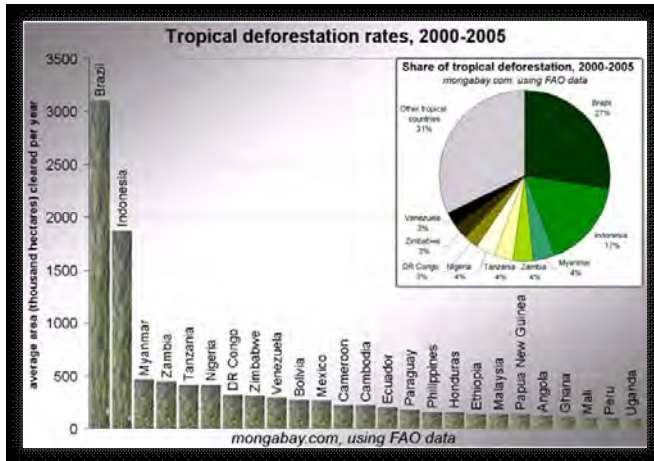


Fig. 1: Deforestation in Tropical Countries

## 2 Research Problems

Excessive and persistent forest disturbance encouraged the decision makers to provide the most updated and accurate information regarding to the dynamics of the land cover which is important to help them in managing those forest areas. This study demonstrated the use of remote sensing for land cover classification using non-linear techniques, and estimation of above ground biomass (AGB) using a non-destructive approach. Landsat 7 ETM image was used as the main input, as this image is widely available.

## 3 Study Area Descriptions

The study site was on the Labanan forest concession, a tropical lowland forest dominated by mixed *Dipterocarp* sp. vegetation, located in East Kalimantan Province, Indonesia (Figure 1). Geographically, this region is situated along the equator between  $1^{\circ} 45'$  to  $2^{\circ} 10'$  N and  $116^{\circ} 55'$  to  $117^{\circ} 20'$  E covering  $830 \text{ km}^2$ . The forest area is situated in a relatively flat region with elevation ranging from 50 - 650 meters above sea level, and annual rainfall is of ca. 2000 mm. The concession area is mainly situated in the inland of coastal swamps developed on undulating to rolling plains with isolated masses of high hills. The landscape is mainly classified into flat land and sloping land, while in the southern part there are steeper and more complex landforms (MANTEL, 1998).

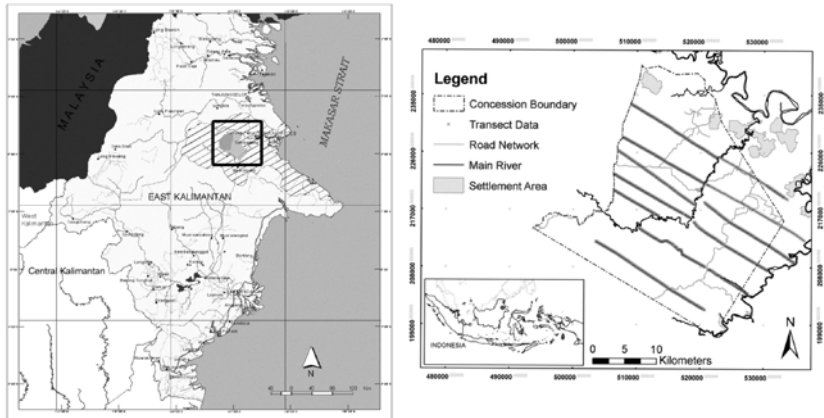


Fig. 2: The Study Area

## 4 Land Cover Classification

### 4.1 The Workflow

We calculated different texture data based on Geostatistics and applied these data for the classification of Landsat 7 ETM image. Selection of moving window was very critical for estimating texture features from satellite data since information from texture data can only be useful if the moving window is carefully selected (WIJAYA, MARPU & GLOAGUEN, 2008). Before the Geostatistics texture features were estimated, semivariance of each land cover class was calculated to find the maximum range where neighboring pixels were spatially correlated. We found that middle infra red band (ETM Band 5) and near infra red band (ETM Band 4) have higher mean variance compared to ETM Band 1, 2, 3 and 7. Thus, univariate geostatistical texture features, i.e. fractal, variogram, rodogram, and madogram, were estimated using ETM band 5. Computation of multi-variate texture features (i.e. pseudo-cross variogram and pseudo-cross madogram) which needs two predictors were performed using ETM band 5 and ETM band 4 as primary and secondary predictors, respectively. Logged over forest, burnt areas/open forest, dense forest and hill shadow classes were spatially correlated within 5 lags, whilst road network and clear cut forest/bare land showed spatial correlation of more than 7 lags. As we concerned for the classification of forest classes, a  $5 \times 5$  window size was selected in calculating the texture features. Supervised classification using back-propagation neural networks (BP-NN), support vector machine (SVM) and maximum likelihood method (MLC) were performed (MARPU, WIJAYA & GLOAGUEN, July 2008) and variations of: (1) ETM data and (2) ETM and texture features were used as input data. Classification accuracy was assessed using confusion matrices estimating overall accuracy and Kappa Statistics. This study explored the performance of Geostatistics and fractal dimension texture features in improving spectral data classification with regards to different nature of classification techniques.

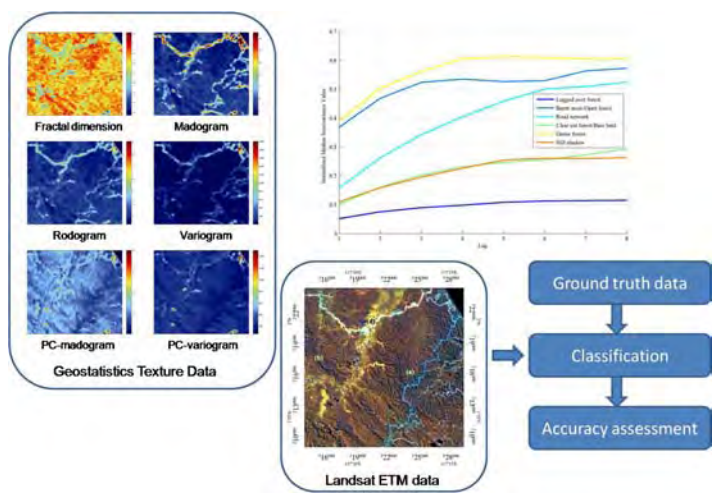


Fig. 3: Workflow of Image Classification

4.2 Classification Results

Using individual ETM data, the overall accuracies of SVM, MLC and BP-NN methods were 77%, 79% and 76%, respectively (Fig.4).

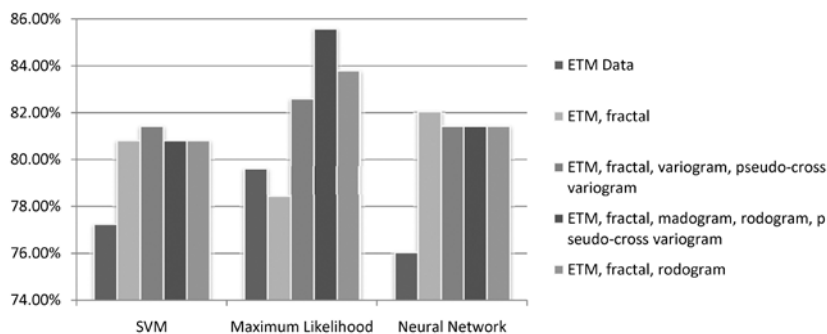


Fig. 4: Accuracy of the classification results

The accuracies of those classifiers were increased up to 81.5% (using SVM, input data: ETM data, fractal dimension, variogram and pseudo cross variogram texture features), 85.5% (using MLC, input data: ETM data, fractal dimension, rodogram, madogram and pseudo-cross variogram) and 82% (using BP-NN, input data: ETM data, fractal dimension), respectively, when the texture features were applied.

We noticed fractal texture was more superior to other texture features. Combination of fractal texture feature, rodogram and madogram in general was very useful to improve the accuracy of spectral data classification. Assessment of the classification accuracy was conducted and we found that the texture data improved the accuracy of spectral data classification by 5 to 10% in average.

Besides the increased accuracy, the application of geostatistics and fractal dimension texture features reduced the salt and pepper effects which commonly occurred in pixel-based classified image (Fig.5).

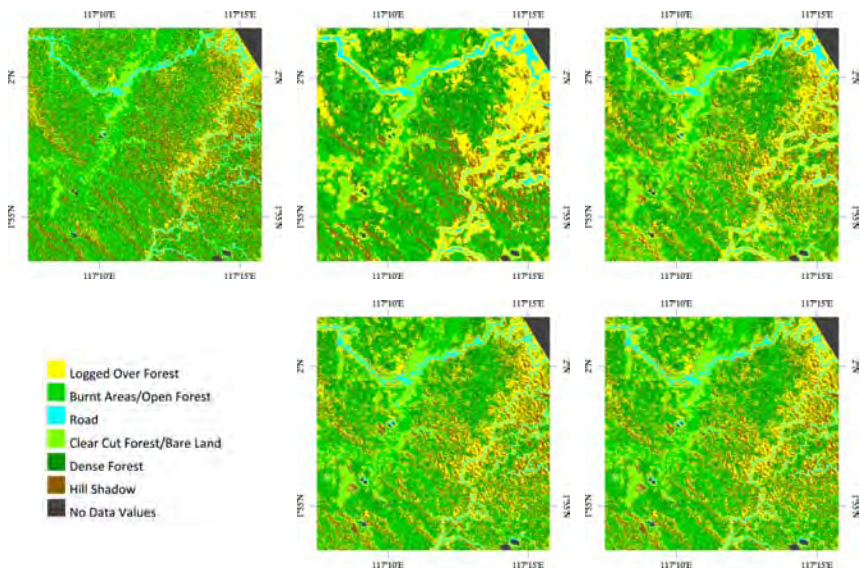


Fig. 5: Classified images, using (a) ETM data, (b) ETM, fractal dimension texture, (c) ETM, fractal dimension, variogram, pseudo-cross variogram texture, (d) ETM, fractal dimension, madogram, rodogram, and pseudo-cross variogram texture, and (e) ETM, fractal dimension, rodogram texture, as input data



## 5 Estimation of Above Ground Biomass using Remote Sensing and Field Observation Data

### 5.1 The Workflow

Above ground biomass (AGB) was approached combining remote sensing and field observation data. We used the ETM data, vegetation indices, and DEM data to estimate the AGB: Number of stems per hectare was used as ancillary data. There are several approaches to calculate above ground biomass (AGB) using remote sensing. We can develop our biomass equation based on field measurement data, e.g. stand volume, basal area, tree diameter, and number of stems, and correlate those data with satellite data, texture data, etc (WIJAYA & GLOAGUEN, 2008). The estimation of biomass was carried out by converting the stand volume per hectare into AGB and extrapolated the results over the study area. The AGB estimate then extrapolated over the study area using Ordinary Kriging to study the spatial distribution of the biomass (Fig. 6). Correlations with forest parameters data, e.g. stand volume, basal area, etc were carried out to study the relationship among those parameters with the biomass. Due to unavailability of biomass data we compared the estimation results with the results of previous studies.

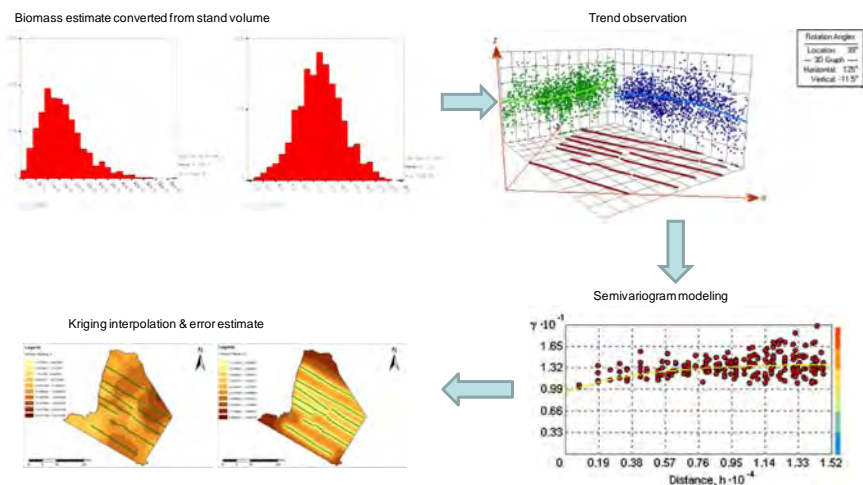


Fig. 6: Flowchart of the estimation of AGB's spatial distribution using Kriging

### 5.2 Relationship between Above Ground Biomass (AGB) and Forest Parameters

The AGB estimate was plotted with stand volume (Fig. 7a), basal area (Fig. 7b) and number of stems (Fig. 7c) with coefficient of determination of 0.93, 0.463 and 0.673, respectively. The estimate was in general underestimated; this problem might be due to saturation problem of the ETM data, which failed to predict higher AGB density.

The AGB estimate showed strong correlation with stand volume because the AGB was estimated from stand volume using volume – biomass conversion models (BROWN & LUGO, 1992; FEARNside, 1997). We also found good predictors for AGB, namely stem volume and basal area. In fact this study implemented number of stems as one of AGB predictors, and combination with remote sensing data was also experimented. The combination of remote sensing data (i.e. ETM data, vegetation indices, DEM) and field observation data (i.e. number of stems per hectare) was the best predictors for above ground biomass as compared to the individual use of those data.

### 5.3 AGB Estimate

We estimated  $368 \pm 70$  ton/ha and  $556 \pm 105$  ton/ha of biomasses predicted using Brown – Lugo and Fearnside equations, respectively. Compared to other biomass models generated for tropical forest regions (Tab.1) (BROWN & LUGO, 1992; SAMALCA, 2007), the Brown – Lugo model resulted in more similar prediction, therefore the AGB estimated using this model might be used as an initial prediction of biomass over our area. For tropical forest environment, the carbon contents was estimated approximately 55% of the biomass, thus we estimate that  $55\% \times 368$  ton/ha = 202.4 ton/ha of carbons can be absorbed and sequestered from the forest area.

Tab.1: Above Ground Biomass (AGB) Estimates

	AGB <sub>BL</sub>	AGB <sub>FS</sub>	Brown Model (1997)	Samalca Model (2007)
AGB Estimate (ton/ha)	368	556	336	311
SD (ton/ha)	70	105	482	382

The point AGB estimate was extrapolated using ordinary Kriging with the assumption that no anisotropy effects occurred. The error estimate (Fig. 8c) increased as the predicted point move farther from the observation data (Fig. 8a).

## 6 Conclusion

Image classification using Geostatistics and fractal dimension texture features as ancillary data for spectral data was successfully increased the accuracy up to 85.5%. The MLC outperformed two non-linear classifiers, namely SVM and BP-NN. The texture features derived using fractal dimension, madogram and rodogram have more information as compared to other texture.

The above ground biomass (AGB) was estimated using a non-destructive approach, and we found Brown – Lugo model is more accurate than Fearnside equation for our study area, upon comparison with previous studies conducted in similar forest regime. Ordinary Kriging was applied to extrapolate the point AGB estimate in order to study the spatial distribution of biomass over the study area.

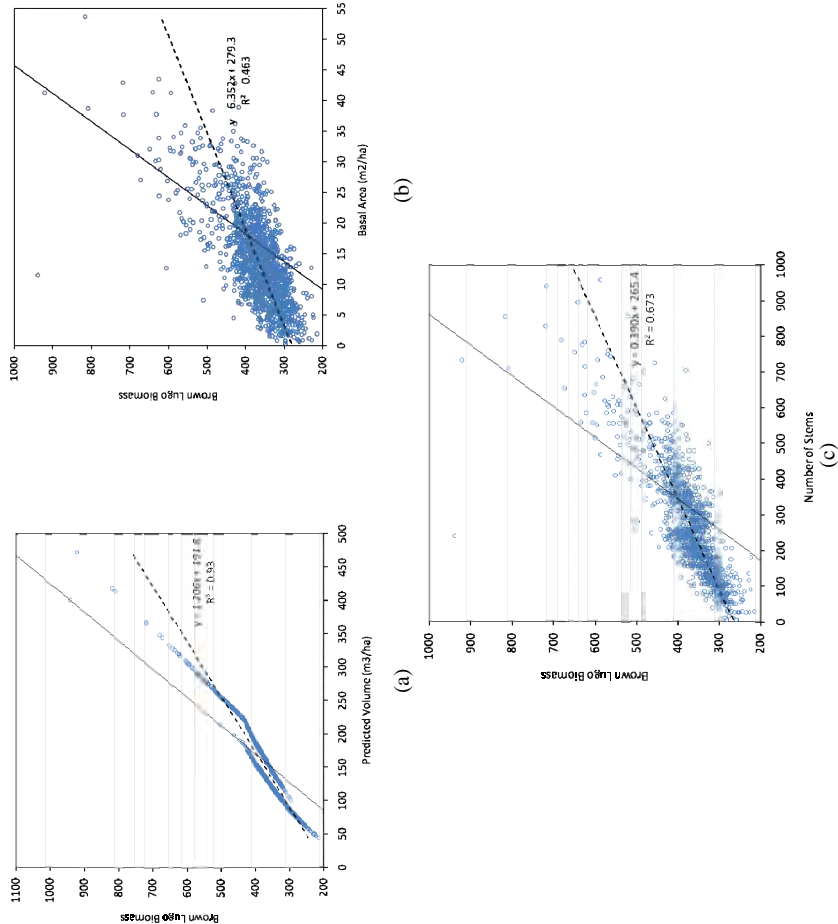


Fig. 7: Biomass Estimate versus a) predicted volume, b) basal area and c) number of stems

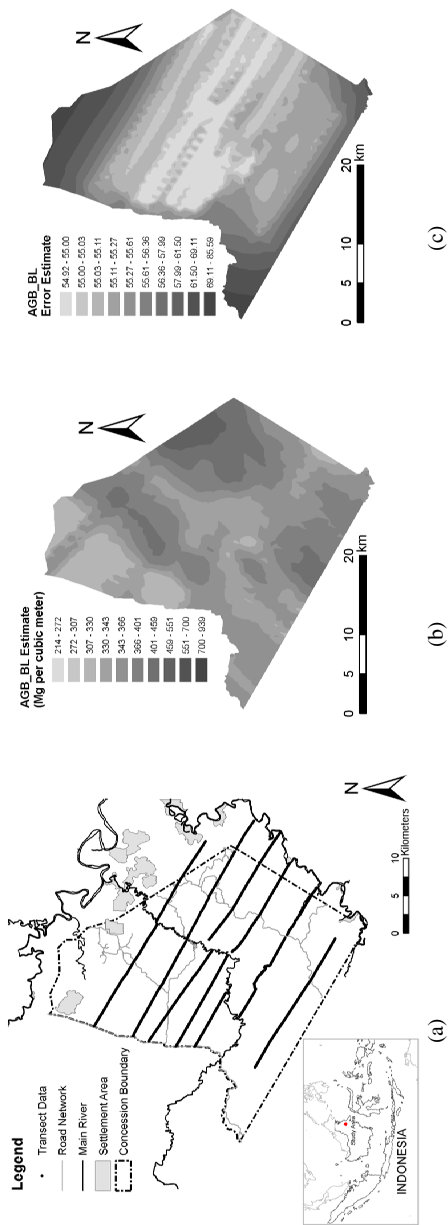


Fig. 8: Sampling data distribution (a) and the results of biomass Kriging (b,c)

## 7 References

- FAO, 2003: State of the world's forests. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- MOF, 2002: Info Kehutanan. Indonesian Ministry of Forestry (MoF), Jakarta.
- MANTEL, S., 1998: Soil and Terrain of the Labanan Area: Development of an environmental framework for the Berau Forest Management Project. Pp. 142 pp. Berau Forest Management Project, Berau.
- WIJAYA, A.; MARPU, P. R. & GLOAGUEN, R., 2008: Geostatistical Texture Classification of Tropical Rainforest in Indonesia. Pp. 199-210 in Alfred Stein, J. S., and Wietske Bijker (ed.). *Quality Aspect in Spatial Data Mining*. CRC Press Inc.
- MARPU, P. R.; WIJAYA, A. & GLOAGUEN, R., July 2008: Soft Classification and Assessment of Kalman Filter Neural Network for Complex Landcover of Tropical Rainforests. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. Boston, USA.
- WIJAYA, A. & GLOAGUEN, R., 2008: Spatial estimation of stand volume using integration of field measurement and remote sensing data of tropical rainforest in central Indonesia. Pp. 189-198. In *Proceedings Of Gemeinsame Jahrestagung Der SGPBF, DGPF Und OVG*. DGPF, Oldenburg.
- BROWN, S. & LUGO, A. E., 1992: Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon. *Interciencia* 17:8 - 18.
- FEARNSIDE, P. M., 1997: Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management* 90(1):59-87.
- SAMALCA, I., 2007: Estimation of Forest Biomass and its Error: A case in Kalimantan, Indonesia. Pp. 84. *Geo-Information Science and Earth Observation for Environmental Modelling and Management*. ITC Netherlands, Enschede.

## Embedding of high resolution models into a low(er) resolution digital elevation model

G. AGUGIARO<sup>1</sup> & T.H. KOLBE<sup>2</sup>

*Kurzfassung: In diesem Artikel wird ein neuer, deterministischer Ansatz zur Integration von zwei Datensätzen vorgestellt, welcher eine Übergangsfläche zwischen einem niedrig aufgelösten Digitalen Geländemodell (DGM) und einem hoch detaillierten Laser-Scanner-Modell definiert und berechnet. Diese Oberfläche ermöglicht einen glatten Übergang und berücksichtigt dabei nicht nur die notwendige geometrische und topologische Kontinuität, sondern auch die Punktdichte. Voraussetzung ist, dass beide Datensätze georeferenziert sind und – bis zu einem gewissen Maße – dasselbe Objekt darstellen. Außerdem muss das hoch detaillierte Modell nicht nur das eigentliche Objekt darstellen, sondern, so wie bei einem „Kragen“, zusätzliche umliegende Informationen aufweisen, die der Übergangsfläche-Modellierung dienen, statt – wie sonst üblich – während der Punktwolke-Editierungsphase eliminiert zu werden.*

### 1 Introduction

As geodata is becoming more and more ubiquitous and applications based on it are literally flourishing in a wide array of fields, from the most specialised to everyday life ones, it can be assumed, in very general terms, that the whole terrestrial globe has been mapped so far – in different levels of accuracy, of course.

One example could be projects like Google Earth or Microsoft Virtual Earth, where multiple datasets are merged together and allow for a multi-scale representation of the Earth's surface. Another example, at a larger scale, are 3D city models, which have been literally booming in the last few years: integration of different models like digital terrain models (DTMs), buildings, transportation facilities etc. is presently a hot topic which is gathering worldwide large research efforts (KOLBE, 2008). For one last example, at an even larger scale, one could think of high resolution models which are being produced thanks to quickly spreading technologies like laser scanning, which are becoming a quite common means of data acquisition for architectural objects (but not only!).

With these few and simple examples in mind, it can be therefore assumed that some portions of the Earth have been represented in multiple, different models, which vary in resolution and precision, data structure or simply geographical extension. One can think for instance of the underlying geometry structure (a mesh or a point cloud, a boundary-representation or Constructive Solid Geometry model), or the related topology (2D, 2.5D, 3D etc.), or simply the diachronic origin of datasets representing the same object.

---

<sup>1</sup> Giorgio Agugiaro, Università di Padova, Laboratorio di Rilevamento e Geomatica, Via Marzolo 9, 35121 Padova – Italien; Email: [giorgio.agugiaro@unipd.it](mailto:giorgio.agugiaro@unipd.it) (corresponding author)

<sup>2</sup> Thomas H. Kolbe, TU Berlin, Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin; Email: [kolbe@igg.tu-berlin.de](mailto:kolbe@igg.tu-berlin.de)

However, as soon as two or more heterogeneous models need to be combined, this task may not reveal itself as an easy one due to several possible issues concerning any of the aforementioned inconsistencies.

In this paper geometric and topological issues are considered in the sight of data integration between a laser-scanner acquired model and a lower resolution DTM. Particular attention is paid to the overlapping zones. A prerequisite is in fact that the high resolution model has been acquired with some extra information around it (which is common in laser scanner point clouds), so that one can think of a sort of “collar” around the scanned object. Using this extra information, the aim is to create a transition surface between the two models, which connects them without modifications at the actual high resolution object and which permits a transition also in terms of point density.

The idea of defining a collar around objects with the purpose of data integration is being investigated by other authors, too. SCHMITTWILKEN et al. (2007), for example, attempt to capture semi-automatically detailed building models aiming particularly at the building collars, i.e. the transition from facades to the digital elevation model.

DTM integration and enhancement are subject of present research by several groups: KAREL & KRAUS (2006) deal specifically with DTM quality assessment and present diverse local measures for the quantification of DTM quality. KOCH (2005) has proposed an approach for enhancing a DTM with data coming from a two-dimensional topographic vector dataset. STADLER & KOLBE (2007) analyse different data qualities with respect to their semantic and spatial structure, because semantic information can help to reduce the ambiguities for geometric integration, if it has been coherently structured with respect to geometry.

## 2 Definition of the transition surface

Two synthetic models sharing the same coordinate system are represented in Figures 1a and 1b as an example. They are a low resolution DTM (in green) and a high resolution object (in yellow/black) respectively. The two overlapped models distinguish three zones that can be described as follows:

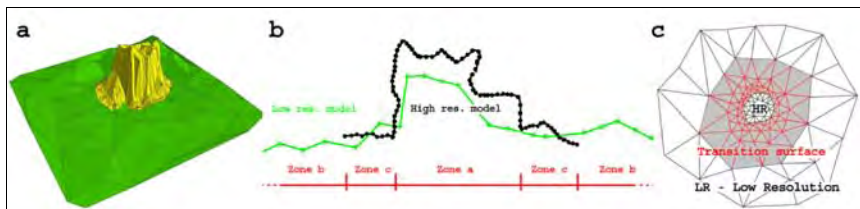


Figure 1: [a, b] Synthetic examples for a low resolution DTM (in green) and a high resolution model (in yellow/black); three different zones result from the two overlapping models; [c] The transition surface is intended to guarantee a smooth transition also in terms of point density.

Zone a) The high resolution object. Low resolution data in this zone will be absent in the final integrated model;

Zone b) The outer, low resolution DTM points, which are not overlapped by any high resolution data;

Zone c) The overlapping zones, which contain data from both the high and low resolution models. Points in this zone refer to the same object (it is the collar), however some slight differences can be seen, for example with regard to the height profile.

In the overlapping zones a transition surface is wanted, which connects geometrically and topologically both models and where the following properties are ensured:

- An inner border, connected with the high resolution object, and an outer border, connected with the low resolution DTM, mark the extents of the transition surface,
- Both high and low resolution data can be contained in it,
- No height values are modified outside the borders, thus leaving the high resolution object and the outer, low resolution DTM unchanged,
- At the borders, at least height and tangential continuity (in the following referred as C0 and C1 respectively) must be guaranteed,
- There must be a smooth transition also in terms of point density. This means that triangles of growing size should characterise the surface while moving from the inner border to the outer border (Figure 1c).

In order to define a transition surface, some initial assumptions are made with regard to the input data: both datasets must be triangulated meshes, georeferenced and must have been previously aligned. Like mentioned before, the high resolution laser-scanner model must have been acquired with some extra information surrounding the actual object, so that the extents of the dataset are larger than strictly needed. Generally, this extra information is pruned during the following point cloud editing, but in this case it is used for modelling the transition surface. Finally it is assumed that (at least) the collar is 2.5D – only one height value is given for each couple of planimetric coordinates – and the borders defining the collar on the high resolution model are given.

### 3 Local quality parameters and borders

The procedure for obtaining the transition surface has been divided into successive steps. In the first one, both datasets are characterised by means of local parameters like point density and average distance from neighbouring points. For every dataset, these local parameters are calculated on a per point basis directly on the triangulated surface itself instead of the xy-plane. Besides, local height differences between the two models are computed on the z-axis. Every high resolution point is projected onto the low resolution mesh and vice versa (Figure 3b).

The extent of the overlapping zones is, by hypothesis, provided as an input (Figure 2a). In particular, the inner border is a closed 3D-polyline obtained from adjacent triangle edges of the high resolution mesh. This polyline separates the high resolution object from the collar and is intended to remain unchanged. The outer border is a closed 3D-polyline, it originates from the high resolution mesh and is then projected (on the z-axis) on the low resolution mesh.

Inside this domain, which is defined by the two borders in the xy-plane, a new constrained Delaunay mesh (SHEWCHUK, 1996) is obtained, using both high and low resolution points



(Figure 2b). The inner and outer borders are treated as hard-breaklines. The external points of overlapping low resolution triangles are also included, in order to guarantee a topologically continuous surface, so that the outer border points are now connected to the low resolution ones. No other constraints are considered at this stage. This can be seen, for example, in Figure 2c where the height values of the points in the transition zone are not smoothed yet.

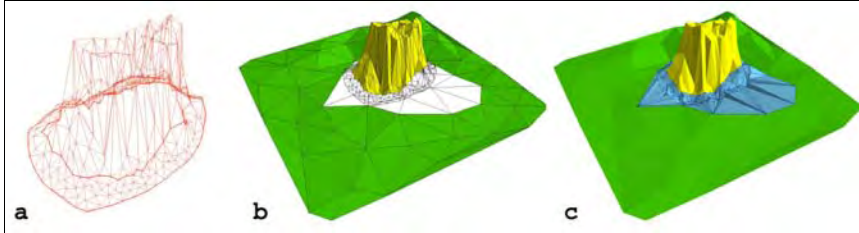


Figure 2: [a] Synthetic examples for a high resolution mesh with inner and (not yet projected) outer border; [b] Points belonging to the white triangles are used for a constrained Delaunay triangulation; [c] Inside the transition surface (in azure) height values have not been modified yet.

#### 4 Height profile

Once the new constrained triangulation has been carried out, topological continuity has been achieved. However, the height profile inside the transition surface has not been modelled yet. Ideally, height values should be more “similar” to the DTM the closer they get to the outer border and – vice versa – they should be more “similar” to the high resolution object, the closer they get to the inner border. For this purpose, a height interpolation model and the accompanying distance-dependent weights must be formulated.

Once a  $[0,1] \times [0,1]$  domain is defined, where the  $x$ -axis represents a normalised distance parameter and  $y$ -axis the range of the weight values, several functions can be easily defined.

Linear or exponential functions like  $y=f(x)=x$  or  $y=f(x)=x^a$  (with  $a>0$ ,  $a \neq 1$ ) guarantee C0 continuity, but they are not suitable for tangential (C1) continuity. This can be seen in Figure 3a, where point (0,0) corresponds to the height value of the low resolution model at the outer border, and point (1,1) represents the height value of the high resolution model at the inner border. If, instead, a piecewise polynomial curve like a uniform spline of second degree is chosen, like

$$y = f(x) = \begin{cases} x^2 & 0 \leq x \leq 0.5 \\ -2x^2 + 4x - 1 & 0.5 < x \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

the required level of continuity can be achieved. However, a proper formulation must be given to the  $x$  parameter, which represents the normalised distance between inner and outer border for any point belonging to the transition surface (Figure 3b). Hence, it is so defined:

$$x = \frac{d_{\text{outerBorder}}}{d_{\text{outerBorder}} + d_{\text{innerBorder}}} \quad (2)$$

where:

$d_{\text{innerBorder}}$  = shortest path between a point and the inner border with respect to the annular shape of the domain in the xy-plane,

$d_{\text{outerBorder}}$  = shortest path between a point and the outer border with respect to the annular shape of the domain in the xy-plane.

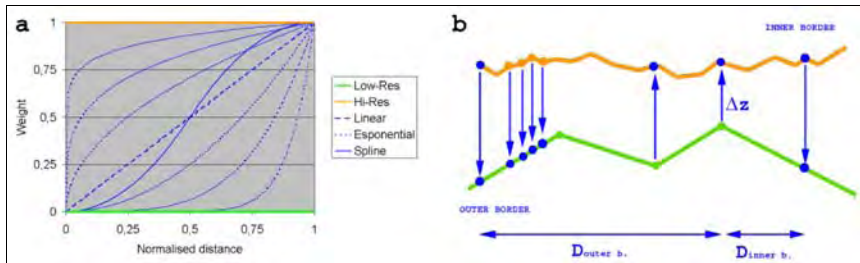


Figure 3: [a] Different weight functions: linear, exponential (with varying exponential values) and spline; [b] Height differences ( $\Delta z$ ) between the two models are obtained by projecting high resolution points on the low resolution mesh and vice versa. Distance values from the borders are calculated on the xy-plane.

With regular convex shapes, computation of distance can be generally performed with simple Euclidean distance functions. However, in case of extremely irregular shapes (concavities of the borders, presence of multiple holes etc.) a more general solution consists in calculating distance values from the inner and outer borders separately and then combining the two partial results. The distance is obtained through progressive iterative buffering, from the inner border outwards, and vice versa, from the outer border inwards (Figures 4a, 4b and 4c). Once the  $x$  parameter and the weight function  $y=f(x)$  have been determined, the height profile inside the transition surface can be calculated. Thus C0 and C1 continuity at the borders are now added (Figure 4d).



Figure 4: [a,b] Examples of progressive buffering from the inner border outwards and vice versa; [c] Three-dimensional representation of the combination of the two buffer maps; [d] After the spline height model is applied, C0 and C1 continuity at the borders are guaranteed.

## 5 Progressive mesh simplification

In the last step the transition surface is progressively simplified in terms of point density between high and low resolution datasets. Density should decrease gradually from the inner to the outer border. Out of the several mesh simplification algorithms that have been developed in the last 20 years (LUEBKE, REDDY et al., 2002) and that allow to eliminate selected points of the mesh within a certain error value, “Simplification Envelopes” (COHEN, VARSHNEY et al., 1996) has been chosen. This approach is conservative to mesh topology and permits to define a varying error value, which is needed for the preservation of details that are not to be oversimplified.

In Simplification Envelopes, two offset surfaces  $S^+$  and  $S^-$  are calculated from the input mesh  $S$ . These surfaces are distant no more than  $\varepsilon$  from  $S$ .  $S^+$  is created by a displacement along the normal of every vertex of  $S$  by  $\varepsilon$ ,  $S^-$  is similarly created by a displacement of  $-\varepsilon$ . Since  $S^+$  and  $S^-$  are not allowed to self-intersect, the simplified model lies between these surfaces. Mesh simplification is obtained iteratively: a mesh vertex is removed from  $S$ , a hole is created which is then triangulated again. If the new triangles do not intersect with the offset surfaces, they are accepted, the point is deleted and the algorithm can continue.

In general, the expected level of mesh simplification is proportional with the  $\varepsilon$  value. This property fits the needs of a gradually increasing simplification from the inner border to the outer border. So, a starting value of  $\varepsilon=0$  can be set for the inner border points and, since  $\varepsilon$  can vary on a per vertex basis, it can grow towards the outer border, up to an  $\varepsilon_{\max}$  value. Similarly to the weight function in (1), a proper distance-dependent  $\varepsilon$  function (from the inner to the outer border) can be defined as follows:

$$\varepsilon = g(x, \varepsilon_{\max}) = f(1-x) \cdot \varepsilon_{\max} \quad (3)$$

where:

$f(1-x)$  = a spline function, as in (1)

$x$  = distance parameter, as in (2)

$\varepsilon_{\max}$  = maximum displacement value for the offset surfaces

Since, presently, the  $\varepsilon_{\max}$  value still needs to be determined heuristically, further work is planned in order to define an approach which can automate this step.

## 6 Experimental results

In the following figures some experimental results from real data are presented. The datasets refer to an archaeological site located in Montegrotto Terme (near Padova, Italy) and have been acquired by the members of the Laboratorio di Rilevamento e Geomatica – Università di Padova. Input models are a low resolution triangulated DTM, obtained from a stop-and-go GPS surveying campaign, and two high resolution meshes of excavation pits, obtained by a terrestrial laser scanner. All datasets are georeferenced and “clean” (no outliers, no mesh self-intersections, etc). With the usual colours used throughout this paper, the low resolution model is represented

in green, the transition surface in azure and the high resolution models in yellow. Figures 5 to 10 (and the accompanying captions) document and exemplify the steps described before.

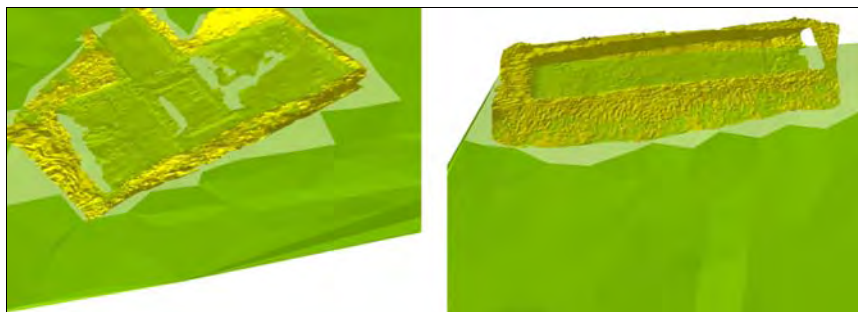


Figure 5: Input meshes: low resolution DTM (in green) and high resolution models (in yellow) overlapped. Some DTM triangles in light transparent green allow the view of the actual high resolution objects, the excavation pits.

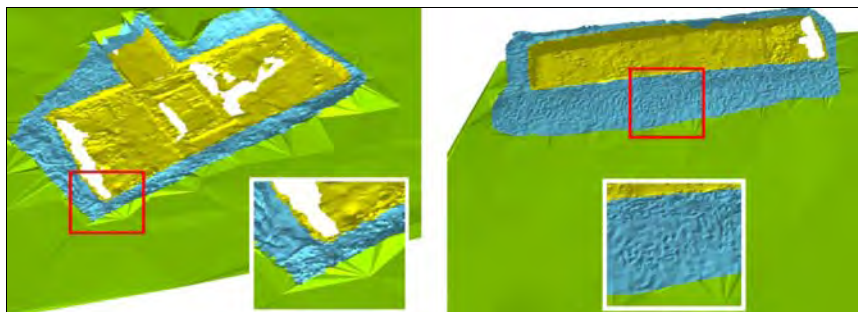


Figure 6: Constrained Delaunay triangulation inside the transition domain: height values have not been modified yet.

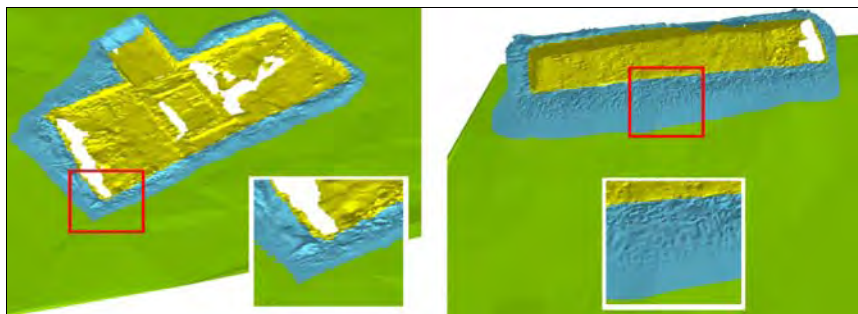


Figure 7: Height values in the transition surface are smoothed by means of the spline function.

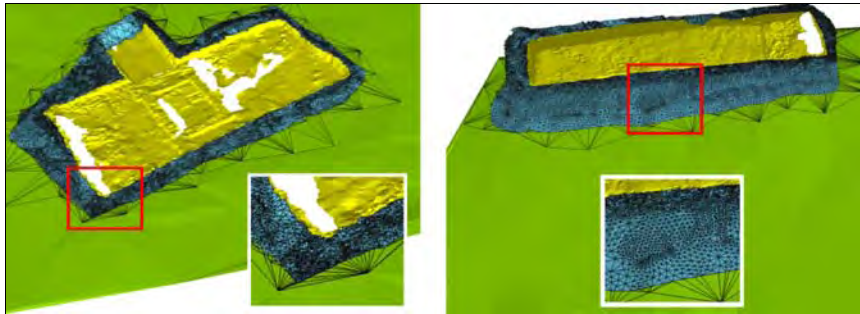


Figure 8: The transition surface before progressive mesh simplification.

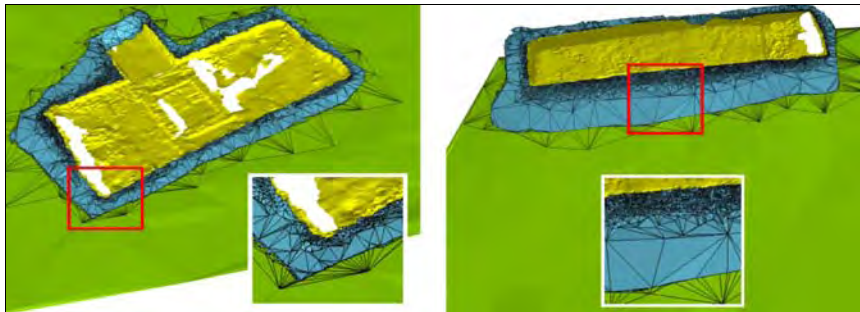


Figure 9: The transition surface after progressive mesh simplification ( $\epsilon_{\max}=5$  cm).

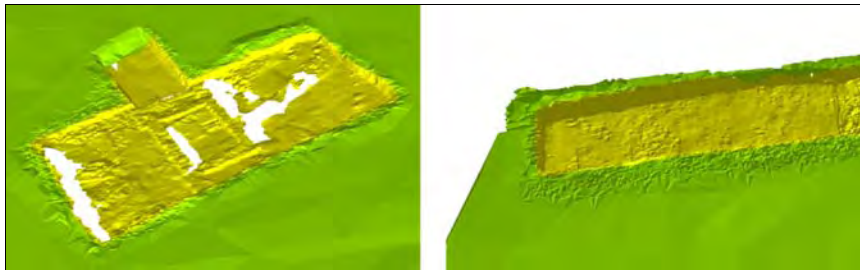


Figure 10: Final model resulting from the integration of the input datasets. Green and yellow colour coding is still used only to (visually) distinguish the excavation pit from surrounding the DTM.

Implementation has been carried out primarily in the PostgreSQL object-relational database, in tight conjunction with its “extension” PostGIS. The built-in procedural languages (PL/pgSQL) have been used for server programming and scripting. Quantum GIS has been chosen as data inspection tool, given its support for PostGIS datasets. Furthermore, it offers an easy integration with GRASS GIS, the source format of the data and where previous work had been carried out (ACHILLI, AGUGIARO et al., 2008).

## 7 Conclusions and outlook

The method presented in this paper permits the creation of a transition surface between a low resolution DTM and a high resolution model and, thus, a local enhancement of the DTM through a geometrically and topologically correct embedding operation. This is possible if some extra information, defined as “collar”, can be used. The (so far deterministically) computed transition surface fulfils the characteristics initially set. However, some open issues still remain and some improvements will be subject of future work in order to reduce the number of initial simplification hypotheses.

Some unsolved aspects deal with determination of the appropriate size for the overlapping zone in case that the borders are not given as input, or with the computation of the border distance parameter  $x$ . Presently it is determined on the  $xy$ -plane, but an improvement should consider calculating geodesic shortest paths on the actual polyhedral surface.

Moreover, the height difference values between the two input meshes are now calculated on the  $z$ -axis, but this is a limiting factor to 2.5D models only. A more general approach should be applicable to real 3D meshes (including overhangs), too.

Finally, the simplification value  $\varepsilon_{\max}$  is so far heuristically defined. However, it is planned to characterise the  $\varepsilon$  value with a proper value which accounts for point accuracy and point density. This implies a general overhaul of the model through the adoption of a stochastic approach that accounts for spatial data uncertainty, which should help at solving some of the pending issues and at reducing some of the parameters to be specified by the user.

Nevertheless, results obtained with this deterministic approach already provide good integration results with respect to topological correctness and geometric continuity.

## 8 References

- ACHILLI, V.; AGUGIARO, G.; BRAGAGNOLO, D.; SALEMI, G. & STEVANATO, G., 2008: Modello digitale 3D dell'area archeologica di Montegrotto mediante integrazione di dati GPS e laser scanner in ambiente GRASS GIS, Bollettino della Società Italiana di Fotogrammetria e Topografia n. 1, Anno 2008, pages 83-99.
- COHEN, J.; VARSHNEY, A. et al., 1996: Simplification Envelopes, Proceedings of Siggraph (New Orleans, LA, August 4-9, 1996)
- KRAUS, K. & KAREL, W., 2006: Quality Parameters of DTM, in Checking and Improving of Digital Terrain Models/Reliability of Direct Georeferencing, Official Publication No 51, European Spatial Data Research (EuroSDR), ISBN: 9789051794915, Pages 125-139.
- KOCH, A., 2005: An Integrated Semantically Correct 2.5D Object Oriented TIN. Gröger G., Kolbe T.H. (eds) 1st Intern. ISPRS/EuroSDR/DGPf-Workshop on Next Generation 3D City Models. Bonn, Germany, EuroSDR Publication No. 49.
- KOLBE, T.H., 2008: Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML, In: Lee/Zlatanova (eds): Proceedings of the 3rd International Workshop on 3D Geo-Information, Seoul, Korea. Lecture Notes in Geoinformation & Cartography, Springer Verlag.
- LUEBKE, D.; REDDY, M.; COHEN, J.; VARSHNEY, A.; WATSON, B. & HUEBNER, R., 2002: Level of Detail for 3D Graphics, Morgan Kaufmann Publishing, ISBN 1-55860-838-9

- SCHMITTWILKEN, J.; SAATKAMP, J.; FÖRSTNER, W.; KOLBE, T.H. & PLÜMER, L., 2007: A Semantic Model of Stairs in Building Collars, In: Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation PFG, S. 415-428.
- SHEWCHUK, J.R., 1996: Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator, in "Applied Computational Geometry: Towards Geometric Engineering" (Ming C. Lin and Dinesh Manocha, editors), Vol. 1148 of Lecture Notes in Computer Science, pages 203-222, Springer-Verlag, Berlin
- STADLER, A. & KOLBE, T.H., 2007: Spatio-Semantic Coherence in the Integration of 3D City Models. In: Proceedings of the 5th International Symposium on Spatial Data Quality ISSDQ 2007, Enschede, Netherlands, ISPRS Archives.

## 9 Acknowledgements

This research work has been partially carried out thanks to scholarships granted by DAAD (Deutscher Akademischer Austausch Dienst) and Fondazione Cassa di Risparmio di Padova e Rovigo.

We would like to thank Jonathan Cohen and Amitabh Varshney for kindly providing the source code of "Simplification Envelopes" and our colleagues Lothar Gründig and Christian Clemen for fruitful discussions.

# Aufbereitung von mehrfachen IR-Fassadentexturen dreidimensionaler Gebäudemodelle für thermische Inspektionen

LUDWIG HOEGNER<sup>1</sup> & UWE STILLA<sup>2</sup>

*Zusammenfassung: Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der Kombination von Infrarottexturen von Gebäudefassaden zur thermischen Inspektion. Die Texturen werden aus Infrarot-Bildsequenzen abgeleitet und dreidimensionalen Gebäudemodellen zugeordnet, um für die 2D-Bildinformation einen dreidimensionalen Raumbezug herzustellen. Dies ermöglicht Bilddaten verschiedener Messkampagnen in Bezug zu setzen. Die Bilddaten können dabei zu verschiedenen Zeitpunkten, aus verschiedenen Blickrichtungen und von unterschiedlichen IR-Sensoren aufgenommen sein. Der Beitrag greift die Probleme der Überlagerung auf und diskutiert die Auswertung der überlagerten Texturen durch Differenzbilder.*

## 1 Einleitung

Energieeffizienz von Gebäuden und Klimawandel sind zwei eng verbundene Schlagworte der letzten Zeit. Für die Bewertung der Energieeffizienz fehlen aber meist die benötigten Daten. Thermalaufnahmen von Gebäuden können helfen, Schwach- und Schadstellen zu lokalisieren und notwendige Sanierungsmaßnahmen festzulegen (KLINGERT, 2005). Solche Aufnahmen können auch nach einer erfolgten Modernisierung wiederholt werden, um die Änderungen zu dokumentieren. In der bisherigen Praxis der Gebäudethermographie findet die Auswertung direkt auf den Bildern statt. Bei großen Gebäuden sind jedoch mehrere Aufnahmen nötig, um eine Fassade komplett zu erfassen. Die Inspektion von großflächigen Fassaden oder ein Vergleich einer Fassade zu verschiedenen Zeitpunkten wird erheblich vereinfacht durch die Zuordnung der zweidimensionalen Bilddaten zu einem raumbezogenen dreidimensionalen Gebäudemodell (HOEGNER et al, 2007). Die Verwendung eines Gebäudemodells ermöglicht es weiterhin, die äußere Orientierung der Thermal-kamera zu bestimmen.

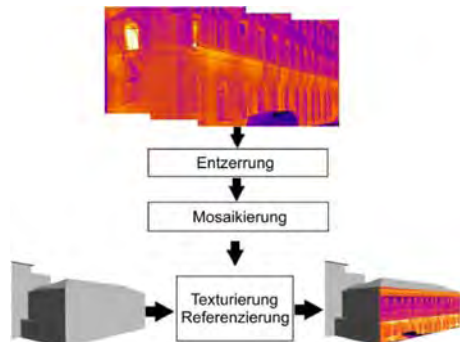


Abb. 1. Schritte zur Texturierung von Gebäudemodellen

1) Ludwig Hoegner, Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München, Arcisstraße 21, 80333 München; E-Mail: [ludwig.hoegner@bv.tum.de](mailto:ludwig.hoegner@bv.tum.de)

2) Uwe Stilla, Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München, Arcisstraße 21, 80333 München; E-Mail: [stilla@tum.de](mailto:stilla@tum.de)



Die Information der äußeren Orientierung wird verwendet, um Teiltexturen zusammenzusetzen und vollständige Texturen von großen oder verschachtelten Fassaden zu erhalten. Zu jeder Fassadenfläche lassen sich in CityGML prinzipiell mehrere Texturen speichern, die z.B. von verschiedenen Blickrichtungen, Zeitpunkten oder Spektralbereichen stammen. Dies erlaubt zum einen die Ergänzung von Bereichen der Fassade, die in einer Textur nicht sichtbar oder schlecht aufgelöst waren, durch eine andere Textur, die die Szene zu einem vergleichbaren Zeitpunkt aus einer anderen Perspektive aufgenommen hat. Zum anderen ermöglicht es die Messung von Intensitätsunterschieden zweier Texturen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen worden sind. Diese Unterschiede werden als Differenz-Textur dargestellt und erlauben Aussagen zur Abkühlung oder Erwärmung eines Gebäudes. Liegt eine ganze Reihe von Texturen einer Fassade vor, die die Temperaturänderung in einem bestimmten Zeitraum zeigen, kann mit dieser Methode für einzelne Teile der Fassade eine Kennlinie der Temperaturänderung erstellt werden. Darüber hinaus lässt sich die Extraktion der Geometrie von thermisch auffälligen Strukturen durch die kombinierte Auswertung mehrerer Infrarot-Texturen verbessern, da sich einige auffällige Strukturen in einer Differenztextur vom Fassadenhintergrund besser abheben als in einer einzelnen Aufnahme.

## 2 Aufgabenstellung

Die Erzeugung von Differenztexturen aus verschiedenen Messungen stellt hohe Anforderungen, an die geometrische Zuordnung von Bild und Modell und an die Mosaikierung einer Fassadentextur aus mehreren Texturen einer Bildsequenz (STILLA & HOEGNER, 2008). Dabei liegen die extrahierten Texturen aus verschiedenen Messungen meistens nicht deckungsgleich und in gleicher Auflösung übereinander. Aus Einzelbildern (siehe z.B. Abb. 2) einer Sequenz, die bei der Vorbeifahrt an einem Gebäude entsteht, wird für jede sichtbare Fassade oder Fassadenteile automatisch ein korrespondierender Bildbereich ausgeschnitten und mit weiteren Bildausschnitten der Sequenz zusammengeführt. Das zur Fassade zugeordnete Bild erhält über ein 3d Gebäudemodell einen Raumbezug und wird als Textur gespeichert (Abb. 4). So ist es möglich, Texturen aus verschiedenen Aufnahmen zu gewinnen und einander zuzuordnen. Ein Vergleich von Texturen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen wurden, erlaubt Aussage zu Temperaturänderungen. Prinzipiell sind dafür radiometrisch kalibrierte Kameras nötig. Die zur Projektion der Bilddaten auf die Fassadenflächen des Modells verwendeten Kameraparameter sind nicht ausreichend genau, um eine direkte Kombination von Texturen durchzuführen. Daher muss die relative Zuordnung von Fassadenaufnahmen verbessert werden.

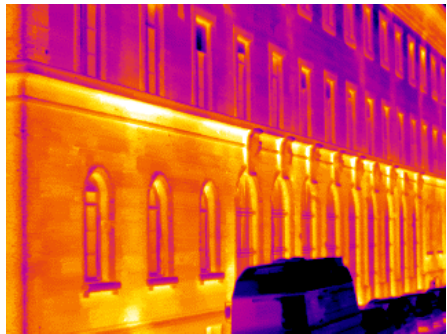


Abb. 2. Einzelbild einer Sequenz von Infrarotaufnahmen einer Fassade

## 2.1 Geometrische Korrektur der Einzeltexturen

Fassaden kühlen typischerweise in der Nacht ab und wärmen sich morgens auf. In zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommenen Bildern variieren somit die Intensitäten. Trotz dieser Variationen zeigen viele Strukturen wie z.B. Fenster in den Texturen einen Kontrast zum Rest der Fassade. Dies erlaubt eine Koregistrierung auf Basis einer Korrelation zwischen zwei Texturen (STEGE et al, 2008). Die Position des Korrelationsmaximums liefert die Lagekorrektur der zweiten Textur relativ zur ersten. Weiterhin wird die Korrelation mit leichten Rotationen durchgeführt, um kleine Winkelabweichungen zwischen den Texturen zu erkennen und zu korrigieren.

## 2.2 Kombination mehrerer Texturen

In der Einleitung in Kapitel 1 sind die verschiedenen Anwendungen für die Texturkombination bereits angesprochen worden. Die Differenztextur kann entweder zur Markierung von unsicheren Intensitätswerten einer Textur verwendet werden, wenn zwei Texturen dieselbe Szenen aus unterschiedlichen Blickwinkeln zeigen, oder sie wird zur Messung der Intensitätsänderung über einen bestimmten Zeitraum verwendet. Im letzteren Fall ist es hilfreich zunächst unsichere Intensitätswerte zu bestimmen. Abbildung 3 zeigt schematisch die einzelnen Schritte, die im Folgenden erläutert werden. Nach den Anpassungen aus Kapitel 2.1 darf davon ausgegangen werden, dass die Texturen einer Fassade deckungsgleich koregistriert vorliegen. Außerdem liegen nach den zu Beginn festgesetzten Vorgaben die Texturen radiometrisch kalibriert vor. Dann gilt für die Intensität  $I(p_{x,y})$  jedes Pixels  $p_{x,y}$  einer Differenztextur  $\Delta p$  zweier Texturen  $p'$  und  $p''$ :

$$I(p_{x,y}) = I(p_{x,y}') - I(p_{x,y}'') \quad (1)$$

Die Textur  $\Delta p$  stellt also für jedes Pixel die Änderung der Intensität von der ersten zur zweiten Textur dar, wobei ein positiver Wert einer Aufheizung entspricht, ein negativer Wert einer Abkühlung.

Sollen zwei Texturen  $A_1$  und  $A_2$  kombiniert werden, um Lücken oder Störungen innerhalb der Fassadentextur zu entfernen, müssen die zu kombinierenden Texturen in kurzem Zeitabstand von verschiedenen Standorten aus aufgenommen werden. Da für kurze Zeitabstände die Intensität der Fassade als konstant angenommen werden kann, zeigt die Differenztextur  $\Delta A$  nur die durch den geänderten Blickwinkel aufgetretenen Unterschiede durch nicht in der Fassadenebene liegende Objekte wie Verdeckungen z.B. durch Fahrzeuge vor der Fassade oder Strukturen, die aus der Fassadenebene hervorstehen oder zurückgesetzt sind. Zeigt Textur  $A_2$  einen Teil der Fassade, der in Textur  $A_1$  nicht enthalten ist, weil eine Verdeckung bereits bei der Texturgenerierung erkannt wurde, so wird das Loch in  $A_1$  mit den Werten aus  $A_2$  aufgefüllt. Besitzen  $A_1$  und  $A_2$  widersprüchliche Informationen an einer bestimmten Position, wird diese Stelle als unsicher markiert. Die daraus resultierende Textur  $A$  beinhaltet jetzt die Informationen aus beiden Eingangstexturen  $A_1$  und  $A_2$  und die Information über unsichere Intensitätswerte der Textur. Die Differenztextur dient in diesem Fall als Maske zum Markieren unsicherer Intensitätswerte bei der Kombination von zwei Texturen.

Soll durch eine Differenztextur die Veränderung der Strahlungsintensität einer Fassade zwischen zwei Aufnahmen bestimmt werden, muss für die Ausgangstexturen A und M folgendes gelten. Beide Texturen zeigen die Fassaden im selben Blickwinkel und unsichere Intensitätswerte sind nach dem bereits beschriebenen Verfahren markiert. Dadurch wird sichergestellt, dass geometrische Effekte die Berechnung nicht beeinflussen. Die Differenztextur D von A und M zeigt in diesem Fall nach Formel (1) die Abnahme und Zunahme der Strahlungsintensität der Fassade. Unsichere Differenzen werden durch die Differenztexturen  $\Delta A$  und  $\Delta M$  markiert und nicht weiter behandelt. Die Differenz der Intensitäten zwischen den Texturen A und M an einer Position  $p_{x,y}$  lässt sich nach (1) für bekannte Aufnahmezeiten  $t$  der Texturen auch ausdrücken als:

$$d = \frac{dI(p_{x,y})}{dt} \quad (2)$$

Dabei ist  $d$  die Steigung, wobei eine positive Steigung einer Zunahme der Intensität entspricht und eine negative Steigung einer Abnahme.

Die Pixel der Texturen können anschließend anhand ihres in  $d$  beschriebenen Verhaltens segmentiert und gruppiert werden. Schreibweise aus (2) wird insbesondere interessant, wenn eine ganze Reihe von Texturen den Verlauf der Intensitätsänderung aufgezeichnet hat. Für Differenztexturen  $D_1$  bis  $D_n$  ergeben sich  $d_1$  bis  $d_n$  Steigungen für jedes Pixel  $p_{x,y}$ , die einen abschnittsweise linearen Verlauf der Intensitätsänderung beschreiben. Bei ausreichend hoher zeitlicher Dichte der Aufnahme kann daraus eine Funktion der Intensitätsänderung über die Zeit angenähert werden.

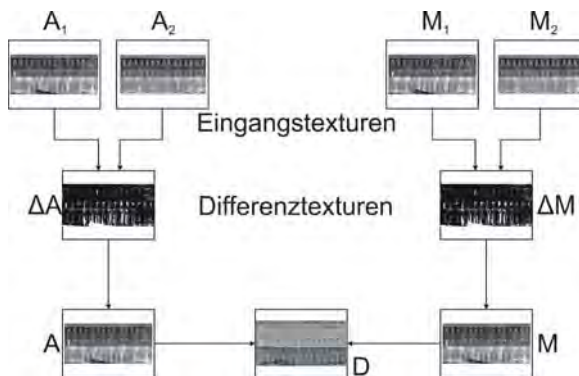


Abb. 3. Einzelne Schritte beim Einsatz der Differenztextur

### 3 Beispieldaten

Abbildung 4 zeigt ein Gebäudemodell mit Infrarottexturen, die aus einer Kameravorbeifahrt automatisch extrahiert wurden (HOEGNER et al, 2007). Auf Grund der Schrägsicht bei der Aufnahme (Abb. 2) und des geringen Abstands von der Fassade durch enge Bebauung ergibt sich ein Restfehler in der Positionierung und Skalierung der Texturen auf den Fassaden. Die Fassaden wurden mit vier Fahrten aufgenommen: Abends mit Sicht nach vorne und anschließend nach hinten und am darauffolgenden Morgen kurz vor Sonnenaufgang mit Sicht nach vorne und anschließend nach hinten. Durch den Wechsel der Blickrichtung ergeben sich Sichtbarkeitsunterschiede auf den Texturen. Die Fassade hat sich von Sonnenuntergang bis Sonnenaufgang abgekühlt.

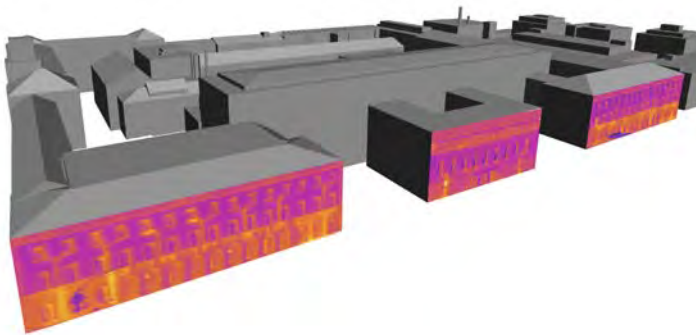


Abb. 4. Gebäudemodell im infraroten Spektrum mit texturierter Straßenseite. Nicht texturierte Fassaden sind durch andere Fassaden oder Störobjekte teilweise verdeckt.

Für die in Kapitel 2.2 beschriebene Kombination von zwei Texturen zur Detektion von Fehlern in den Texturen sind zwei Texturen wie in Abbildung 5 notwendig, die aus unterschiedlichen Richtungen aufgenommen worden sind: Vorwärtssicht (Abbildung 5a) und Rückwärtssicht (Abbildung 5b). Technisch bedingt konnten die Texturen nicht wie in 2.2 gefordert gleichzeitig

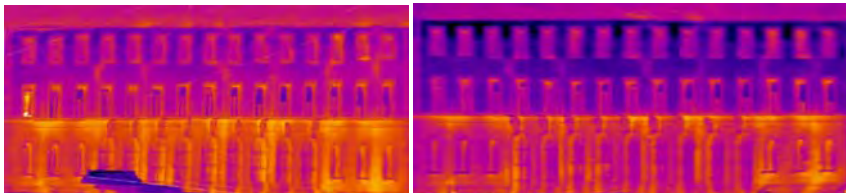


Abb. 5. a) links: Infrarottextur aus der Vorwärtsfahrt, b) rechts: Infrarottextur aus der Rückwärtsfahrt

aufgenommen werden, sondern mit einem geringen zeitlichen Versatz, der zu einer leichten Abkühlung der Fassade geführt hat. Diese Abkühlung für Abbildung 5b wurde für die Erzeugung

der Differenztextur bestimmt und herausgerechnet, um eine gleichzeitige Aufnahme der beiden Texturen zu simulieren. Die Differenztextur beider Texturen ist in Abbildung 6 dargestellt. Zur besseren Visualisierung sind die absoluten Beträge der Änderung dargestellt.

Das linke Fenster der mittleren Reihe (Abb. 6a) ist geöffnet und zeigt eine höhere Temperatur als die Fassade. Das ist nur in der ersten Textur zu sehen. Folglich gibt es hier eine große Temperaturabnahme. Weiterhin parkt vor der Fassade ein Fahrzeug (Abb. 6b), zu sehen im linken Bild (Abb. 5a) unten, das auf Grund der geänderten Perspektive der Aufnahme in der zweiten Textur (Abb. 5b) nicht zu sehen ist. Da das Fahrzeug kälter als die Fassade ist, scheint die Wand hier wärmer zu werden. Die Fenster liegen nicht in der Fassadenebene, sondern sind deutlich zurückversetzt. Auf Grund der Schrägsicht sieht die Kamera jeweils nur eine Innenseite der Fensternische. Diese hat eine andere Temperatur als die Fenster selber, die als Spiegel wirken und die Fensterrollladen, die teilweise heruntergelassen sind. Die Fenster mit Rollläden

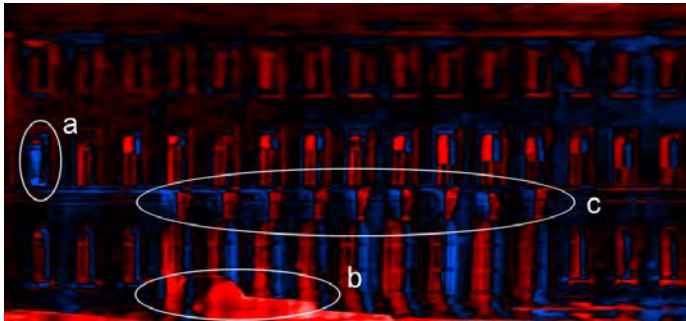


Abb. 6. Differenzbild von Abbildung 5a und 5b. Schwarz: konstante Intensität, rot: höhere Intensität in Textur 5b, blau: höhere Intensität in Textur 5a

sind gut erkennbar an dem Rot-Blauen Balken. Bei den vergitterten Fenstern im Erdgeschoss kommt noch eine Hintergrundbeleuchtung aus dem Gebäude hinzu, die in einer Fahrtrichtung durch das Fenster auf die Kamera scheint. Am deutlichsten ist die Differenz der beiden Texturen bei den oberhalb der unteren Fensterreihe angebrachten Steintafeln (Abb. 6c). Diese stehen aus der Fassade hervor und sind kühler als diese. Durch die Geometrie verdecken sie in den beiden Texturen gegenseitig einen Teil der Fassade. Der rötliche und bläuliche Schimmer auf der Fassadenfläche kommt durch den Zeitversatz der Aufnahmen und die Schätzung der mittleren Abkühlung zu Stande und kann hier ignoriert werden.

Zur Bestimmung der Abkühlung der Fassade wurde eine Abendtextur mit einer Morgentextur verglichen (Abb. 7). Gegenüber Abbildung 6 fällt auf, dass keine kalt-warm Kanten an Tiefensprüngen auftreten, da beide Texturen von derselben Richtung aus aufgenommen worden sind. Zu sehen ist die deutliche Abkühlung aller Fassadenteile. Man erkennt das geöffnete Fenster und auch die Störung durch das parkende Fahrzeug im Bild unten. Zu sehen ist, dass der obere Gebäudeteil unter dem Dach weniger ausgekühlt ist, als die drei Stockwerke mit Büros. Dieser Teil war bereits am Abend deutlich kühler (Abb. 5a). Zu sehen ist auch noch die Störung durch das parkende Fahrzeug.



Abb. 7. Differenztextur der Abendtextur und der Morgentextur, weiß: stärkste Abkühlung

## 4 Diskussion

Die Umwandlung von Infrarotbildern in Gebäudetexturen erlaubt gegenüber der klassischen 2D-Auswertung die Untersuchung von Abkühlungs- oder Aufheizprozessen oder den Vergleich von Fassaden vor und nach Sanierungsmaßnahmen. Da die absolute Abstrahlung eines Gebäudes von vielen Einflüssen wie Heizleistung und Witterung abhängig ist, kann bei längerfristigen Beobachtungen ein Mittelwert als Textur genommen werden. Für die Detektion von Objekten im Infrarot eignet sich die Differenzmessung besonders dadurch, dass die normalen Hintergrundeffekte ausgeblendet werden können und die auffälligen Objekte sich verstärkt abheben. Die hier verwendeten Texturen wurden alle mit derselben Kamera und in annähernd derselben Auflösung aufgenommen, wenn auch aus verschiedenen Blickwinkeln. Es ist auch möglich, Texturen aus anderen Quellen hinzuzufügen, z.B. niedrig aufgelöste Texturen aus Luftbefliegungen. Außerdem ist es durch die Einbettung der Bilddaten in ein 3D-Modell möglich, bestimmte thermale Effekte auf Fassaden zu erklären. Die Aufwärmung einer Fassade durch die Sonne beispielsweise lässt sich im 3D-Raum durch den Sonnenstand erklären oder durch eine zusätzliche Textur, die den Schlagschatten der Sonne zeigt (Abb. 8). Durch die Verfolgung eines Sonnenaufgangs und die Erwärmung der Fassade lassen sich wiederum Rückschlüsse auf die Beschaffenheit der Fassade ziehen. Die Auswertung benötigt für die Validierung und Interpretation Hintergrundwissen, das bisher nur durch den Nutzer geliefert werden kann. Die Aufwärmung oder Abkühlung der Fenster setzt Wissen über den Blickwinkel und die Umgebung voraus, um eine Fehlinterpretation zu verhindern. Ebenso ist es notwendig, zu wissen, wie die Nutzung des Gebäudes war. Ist während der Messungen ein Fenster geöffnet oder geschlossen worden? Ein Fenster, das geöffnet worden ist, kann für die spätere Bestimmung nicht benutzt werden, wie im Falle des offenen Fensters (Abb. 6a). Für eine genaue Bestimmung der Wärmeverluste ist Wissen über die Materialien und ihre Emmissionkoeffizienten notwendig, um den tatsächlichen Wärmeverlust schätzen zu können.

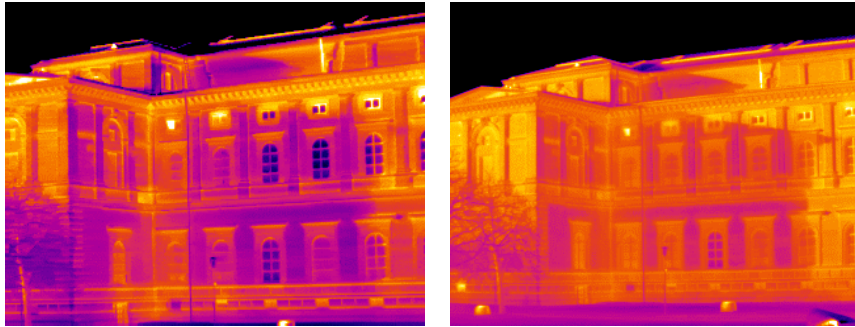


Abb. 8. Gebäude in zwei verschiedenen Spektren: a) links: langwelliges IR, die Fassade ist im Schatten kühler, der Schatten aber nicht direkt zu erkennen, b) rechts: mittleres IR, die Fassade ist im Schatten kühler. Hier tritt der Sonnenschatten klar heraus.

## 5 Danksagung

Für die Bereitstellung des Messfahrzeuges mit IR-Kameras und der Unterstützung bei der Messung danken die Autoren Herrn Dr. Clement, Herrn Dr. Schwarz und Herrn Kremer von FGAN-FOM, Ettlingen.

Die vorgestellten Arbeiten sind Teil des DFG-geförderten Forschungsprojektes „Enrichment and Multi-purpose Visualization of Building Models with Emphasis on Thermal Infrared Data“, das im Rahmen des DFG-geförderten Bündelprojektes „Interoperation of 3D Urban Geoinformation (3DUGI)“ bearbeitet wird.

## 6 Literaturverzeichnis

- HOEGNER, L.; KUMKE, H.; MENG, L.; STILLA, U., 2007: Automatic extraction of textures from infrared image sequences and database integration for 3D building models. PFG Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation. Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. 2007(6), S. 459-468
- KLINGERT, M., 2005: Methoden der digitalen Bildverarbeitung in der Infrarotbauwerks-thermografie. Forum Bauinformatik, BTU Cottbus, S. 287-294
- RUSS, J.C., 2006: The Image Processing Handbook. CRC Press Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742
- STILLA, U. & HOEGNER, L., 2008: IR-Texturierung von 3D-Gebäudemodellen zur thermographischen Inspektion von Stadtquartieren, GIS.Science, 2008(4), S. 12-19
- STEGER, C.; ULRICH, M. & WIEDEMANN, C., 2008: Machine Vision Algorithms and Applications, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, ISBN 978-3-527-40734-7

# Attributierte Grammatiken zur artifiziiellen Verfeinerung von 3D-Stadtmodellen

MARTIN KRÜCKHANS<sup>1</sup> & JÖRG SCHMITTWILKEN<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Attributierte Grammatiken können zur regionstypischen Modellierung von Gebäuden verwendet werden. Eine gebietstypische Darstellung der automatisch abgeleiteten 3D-Modelle ist somit garantiert. Das vorgestellte Verfahren basiert auf der Klassifizierung und Quantifizierung regions- und stiltypischer Merkmale, die in terrestrischen Bildern gemessen und in probabilistische Produktionsregeln überführt werden. Bei der zufallsbasierten Prozessierung der Grammatik entstehen Modelle, die den ermittelten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen genügen.*

*Die Geometrie der modellierten Gebäudeteile wird durch Lage- und Formparameter in den Attributen der Grammatik-Symbole repräsentiert und durch semantische Regeln im Ableitungsbaum propagiert. Aus diesem Grund lässt sich der Ableitungsbaum in beliebige 3D-Formate wie X3D-oder KML überführen.*

## 1 Einleitung

Die Anwendungsgebiete von 3D-Stadtmodellen erstrecken sich von Simulationen für Hochwasser, Mobilfunkwellen oder Umgebungslärm bis hin zur Bürgerbeteiligung bei großen Bauvorhaben. Hinsichtlich der Visualisierung gehen mit diesen Anwendungsbereichen sehr unterschiedliche Anforderungen einher. Den Simulationsszenarien genügen je nach Simulation mehr oder weniger detaillierte Modelle. Die Texturierung und Visualisierung der Gebäude spielt dort eine eher untergeordnete Rolle. Anders verhält es sich bei der kombinierten Darstellung von geplanten und bestehenden Gebäuden. Hier ist eine photorealistische Darstellung notwendig, um einen realitätsnahen Eindruck der Planung zu bekommen.

Seitdem Anbieter und Dienste wie Google Earth und Google Maps, Microsoft Virtual Earth oder OpenStreetMap flächendeckende Geodaten kostenlos verfügbar machen, spielen diese für touristische Belange eine immer größer werdende Rolle – vermitteln die Luft- und Satellitenbilder, Schrägansichten und teilweise 3D-Stadtmodelle dieser Dienste doch einen wesentlich besseren Eindruck des Urlaubsgebiets als es thematische Karten aus Papier tun. Die Anforderungen an die Visualisierung dreidimensionaler Stadtmodelle für die Tourismusbranche oder das Stadtmarketing kombinieren die anfangs genannten Anforderungen an die Visualisierung. Die Modelle sollen möglichst photorealistisch sein, wenngleich eine exakte Rekonstruktion der Realität für einen nicht ortskundigen Betrachter nicht notwendig ist.

Eine exakte und detaillierte Rekonstruktion von Gebäuden aus Bildern oder LIDAR-Daten für flächendeckende 3D-Modelle ist bestenfalls semi-automatisch möglich. Die automatisierte Verfeinerung existierender, niedrig aufgelöster Modelle durch regionstypische, artifiziielle Gebäudedetails schließt diese Lücke. So generierte Detailmodelle sind keine exakte Rekonstruktion der Realwelt, sondern sie stellen vielmehr eine mögliche Erscheinungsform eines Gebäudes dar. Die Erstellung dieser 3D-Stadtmodelle geschieht automatisiert und die einzelnen Gebäudemodelle sehen „so ähnlich“ aus wie die entsprechenden Realweltobjekte.

---

<sup>1</sup> {krueckhans, schmittwilken}@igg.uni-bonn.de



In diesem Beitrag wird ein Ansatz zum prozeduralen Generieren von synthetischen, gebietstypischen Gebäudefassaden vorgestellt. Primitive Gebäudemodelle niedriger Detaillierungsstufe (Klötzchenmodelle) werden geometrisch und semantisch verfeinert. Die Verfeinerung eines niedrig aufgelösten Gebäudemodells erweitert das Modell um eine regionstypische Fassade und hat nicht die Rekonstruktion des entsprechenden Realweltobjekts zum Ziel. Das existierende Modell wird durch Ableiten einer probabilistischen, attribuierten Grammatik semantisch und geometrisch ergänzt. Dabei wird die Grammatik als Formalismus zur Modellierung der Gebäudefassade genutzt. Den Produktionsregeln und den semantischen Regeln liegen Beobachtungen und Häufigkeitsverteilung der Realweltobjekte zugrunde.

Dieser Beitrag fokussiert auf die regionstypische Modellierung der Bonner Südstadt, deren Gründerzeit-Gebäude einerseits sehr prägnant sind, andererseits aber durch eine geringe Anzahl Elementen und ihren Variationen beschrieben werden können.

Die übrigen Abschnitte sind wie folgt gegliedert. Nach einer Übersicht über existierende Arbeiten in den Bereichen synthetische Fassaden und Modellierung von Gebäuden mit formalen Grammatiken in Abschnitt 2 wird die Fassaden-Grammatik und eine prototypische Implementierung in Abschnitt 3 vorgestellt. Abschließend fasst Abschnitt 4 die Ergebnisse zusammen und es werden mögliche weitere Arbeiten aufgezeigt.

## 2 Synthetische Fassaden

Künstliche Fassadentexturen werden verwendet, wenn die Art der Darstellung eine detaillierte Fassade erfordert oder erwünscht, diese jedoch nicht rekonstruiert werden kann oder soll. Stattdessen werden sinnvolle, aber künstliche, Texturen aufgebracht. Ist es für eine Anwendung nicht nötig detailgetreue Abbilder der Realität zur präsentieren, so stellt diese Art der Texturierung eine leicht automatisierbare, schnelle und somit kostengünstige Alternative dar.

COORS (2008) und BAUER et al. (2008) verwenden synthetische Texturen für 3D-Stadtmodelle bei der Fußgängernavigation zur kostengünstigen und realitätsnahen Texturierung der Modelle. BAUER et al. stellen darüber hinaus noch eine XML-basierte Spezifikation für synthetische Texturen vor.

JOBST et al. (2008) und DÖLLNER et al. (2005) präsentieren Arbeiten zur nicht-photorealistischen Texturierung von 3D-Stadtmodellen. Sie thematisieren unter anderem die, aus der 2D Kartographie bekannten, grafischen Variation. Die Autoren heben neben Effizienzvorteilen nicht photorealistischer Texturen auch die Verwendbarkeit für thematische Visualisierungen hervor.

Alle genannten Arbeiten basieren auf der synthetischen Texturierung von Fassaden. Eine weitere Möglichkeit der Erhöhung des Detaillierungsgrads ist die Erhöhung der geometrischen Details. Für 3D-Gebäude- oder Stadtmodelle sind vor allem Arbeiten zur prozeduralen Modellierung der Objekte zu nennen. Im Folgenden werden einige Arbeiten vorgestellt, die diesen prozeduralen Ansatz verfolgen. Sie basieren auf dem Konzept formaler Grammatiken, das von CHOMSKY (1956, 1959) zur Beschreibung natürlicher sowie formaler Sprachen begründet und von KNUTH (1968, 1971) durch Attribute erweitert wurde. Die von Knuth vorgestellten attribuierten Grammatiken waren zur Syntaxanalyse von Programmiersprachen konzipiert und fanden anfänglich vor allem im Compilerbau AHO et al. (1999) Anwendung.

WONKA et al. (2003) präsentieren einen Ansatz, den sie als Splitgrammatik (split grammar) bezeichnen. Ihre Arbeit basiert auf der von DUARTE (2002) vorgestellten diskursiven Formen-Grammatik (shape grammar). Der „Split-Teil“ der Grammatik führt eine Tesselation einer zwei-

dimensionalen (Fassaden)Fläche durch. Zur Überwachung der Produktion werden die geometrischen Symbole attribuiert. Die Attribute legen zugleich das Erscheinungsbild der Symbole fest. MÜLLER et al. (2006) erweitern das Konzept der Splitgrammatiken um Transformation und Rotation der generierten Objekte. Sie nutzen das Konzept zur prozeduralen Modellierung von Fassaden. Dabei werden die Symbole entsprechend der constructive solid geometry (CSG) MÄNTYLÄ (1988) behandelt. So genannte „snap lines“ garantieren die visuelle Korrektheit z.B. von Fensterreihen benachbarter Gebäudeteile. LARIVE & GAILDRAT (2006) stellen eine Fassadengrammatik (wall grammar) vor, die synthetisierte Gebäude erzeugen, deren Grundriss und Höhe gegeben sind. Das Aussehen der Fassaden basiert auf s.g. „wall panels“, die als atomare Objekte durch die Grammatik auf der Fassade angeordnet werden.

### 3 Bonner-Südstadt-Fassaden-Grammatik

#### 3.1 Datengrundlage

Zur Erstellung einer Grammatik, die eine regions- und stil-typische Bausubstanz qualitativ und quantitativ repräsentiert, werden Häufigkeitsverteilungen und geometrische Eigenschaften von Fassadenelementen benötigt. Die erstellten Produktionsregeln und semantischen Regeln der Grammatik implementieren diese und stellen somit die Vielfalt und Geometrie der erzeugten Modelle sicher. Durch die Verwendung terrestrischer Fassadenaufnahmen wird hier diesen Anforderungen entsprochen. Zum einen werden Frontalaufnahmen zur Klassifizierung und Quantifizierung von stil-typischen Merkmalen und zum anderen multiperspektivische Bildserien zur Dimensionierung von Fassadenelementen verwendet.



Abb. 1: Frontalaufnahmen typischer Bonner Südstadthäuser

Die Frontalaufnahmen werden hierbei nur von Fassaden erstellt, die dem regionstypischen Stil entsprechen. Die Interpretation des Stils, also die Entscheidung welches Haus südstadttypisch ist, wird dabei an Hand von stil-typischen Merkmalen vorgenommen. In der Bonner Südstadt sind beispielsweise zwei- bis dreigeschossige Gebäude, aufwändige Ornamente oder verzierte Balkone stil-typisch.

Insgesamt wurden von 200 Gebäuden dieses Stils Frontalaufnahmen erstellt, mit dem Zweck Merkmale des Baustils der Bonner Südstadt wie beispielsweise die Häufigkeiten von Balkonen, Dachgauben oder Ornamente, zu quantifizieren.

Neben den Merkmalen selbst sind Informationen ihrer geometrischen Eigenschaften wesentlich. Die Ableitung von Maßen (z.B. Breite, Höhe, Tiefe und Form eines Balkons) ist jedoch mit Hilfe einfacher Frontalaufnahmen nur bedingt möglich. Aus diesem Grund wurden multiperspektivische Bildserien wie in Abbildung 2 verwendet. Durch die von LÄBE & FÖRSNTER (2006) beschriebene Methode der automatischen relativen Orientierung lassen sich Maße dreidimensionaler Art aus Bildserien eines Objekts bestimmen. Die Methode beruht auf dem Matching homologer Punkte und anschließender Bündelausgleichung, wodurch die Bildserie automatisch relativ orientiert wird. Zur Herstellung der absoluten Orientierung muss die Dimension des Systems festgelegt werden indem die Projektionsmatrix jedes Bildes einer Serie mit einem Maßstab (z.B. die vor Ort gemessene Eingangsbreite) skaliert wird. Die Ableitung von Maßen erfolgt dann durch Berechnung des Strahlenschnitts (räumlicher Vorwärtsschnitt) mit den skalierten Projektionsmatrizen des absolut orientierten Systems.

Die Breite eines Fensters erhält man bspw. durch Auswählen der 2D Bildpunkte der Fenstercken in jedem Bild und anschließender Projektion in den dreidimensionalen Objektraum durch Berechnung des Strahlenschnitts. Das Ergebnis sind zwei dreidimensionale Objektpunkte deren euklidischer Abstand der gesuchten Fensterbreite entspricht. Bildserien dieser Art wurden von 20 Gebäuden der Bonner Südstadt erstellt.



Abb. 2: Multiperspektivische Aufnahmeserie eines Gebäudes

### 3.2 Ableiten von Produktionsregeln

Mit dem Ziel 3D-Gebäudemodelle eines konkreten Stils mit attribuierten Grammatiken automatisch generieren zu können, gehen zwei Forderungen einher. Zum einen muss die Geometrie von Gebäuden generisch beschrieben werden und zum anderen muss gewährleistet sein, dass generierte Gebäude dem zu repräsentierenden Stil entsprechen. Diese Anforderungen werden im Folgenden näher betrachtet.

Zur generischen Beschreibung der Geometrie wird der Formalismus der Splitgrammatiken (WONKA et al. 2003, MÜLLER et al. 2006) verwendet, da diese eine Tessellation der zu „splitten“ Flächen erzeugen und somit eine topologisch korrekte Zerlegung der Fassadenfläche ermöglichen. Im hier vorgestellten Verfahren werden Splitgrammatiken verwendet, um Gebäude-

fassaden symbolisch nach geometrischen und semantischen Kriterien zu zerlegen. Durch rekursive Regelanwendung wird die Fassade, ausgehend von einem Rechteck, zerlegt, so dass abschließend alle Fassadenelemente durch Symbole der Grammatik beschrieben werden (vgl. Abbildung 3).

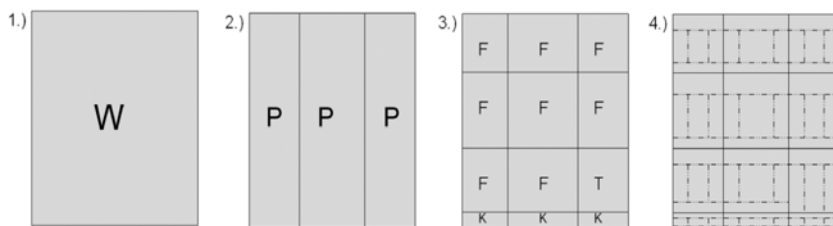


Abb. 3: Hierarchische Zerlegung einer Fassade durch rekursive Anwendung der Splitgrammatik. Symbole: W = Wandfläche, P = planare Fassadenfläche, F = Fensterfläche, K = Kellerfensterfläche, T = Türfläche)

Die Generierung von 3D-Modellen eines gegebenen Stils setzt die Kenntnis von stil-typischen Merkmalen und deren Häufigkeiten voraus. Hierzu werden die quantifizierten Häufigkeiten von Fassadenelementen in Produktionsregeln der Splitgrammatik berücksichtigt. Die Fassadenelemente werden durch Grammatik-Symbole repräsentiert und durch (mehrfache) Regelanwendung aus dem Startsymbol (W = Wandfläche) abgeleitet. Die Wahrscheinlichkeit der einzelnen Produktionsregeln entspricht dabei der Häufigkeit des zu produzierenden Symbols bzw. Fassadenelements.

Es sollte beispielsweise die Zerlegung einer Fassadenwand W in planare Fassadenflächen P in einer Produktionsregel formuliert werden. Dazu wurde aus den Fassadenaufnahmen abgeleitet, dass Gebäude der Bonner Südstadt zu 27% zwei- und 73% dreigeteilt sind. Daraus ergeben sich die in Tabelle 1 gezeigten Produktionsregeln.

Tab. 1: Beispiel von Produktionsregeln zur Zerlegung einer Fassadenfläche

Bezeichnung	Wahrscheinlichkeit	Kontext	Klartext
P1	0.27	$W \rightarrow P P$	zweigeteilt
P2	0.73	$W \rightarrow P P P$	dreigeteilt

Durch die entsprechende Formulierung aller Produktionsregeln für wesentliche Fassadenelemente entsteht eine Grammatik, die die südstadttypische Fassadengeometrie generisch beschreibt. Diese Methode lässt jedoch die Formulierung von detaillierten Fassadenelementen auf Grund der begrenzten Anzahl von Fassadenaufnahmen nicht zu, da bedingte Wahrscheinlichkeiten im Detailbereich nicht identifiziert werden können. Um beispielsweise die Häufigkeit von Balkonen bei zweigeteilten Fassaden zu bestimmen, können nur die Aufnahmen von Gebäuden herangezogen werden, die tatsächlich zweigeteilte Fassaden besitzen. Das heißt, dass in diesem Beispiel

nur noch 27% der ursprünglich 200 Aufnahmen verwendet werden können. Dies führt im Allgemeinen zu der Beziehung: Je detaillierter das Fassadenelement, desto kleiner die Menge der zur Verfügung stehenden Fassadenaufnahmen, woraus folgt, dass ab einer gewissen Detailtiefe keine bedingten Wahrscheinlichkeiten mehr abgeleitet werden können.

Aus diesem Grund wird nach der „groben“ Strukturierung der Fassade (vgl. Abbildung 3) keine weitere Zerlegung der entstandenen Flächen mit Splitgrammatiken durchgeführt. Die noch zu erzeugenden Fassadenelemente wie Fenster, Türen, Ornamente, Balkone usw. werden stattdessen zu Prototypen zusammengefasst. Abbildung 4 zeigt die Prototypen für Fenster.

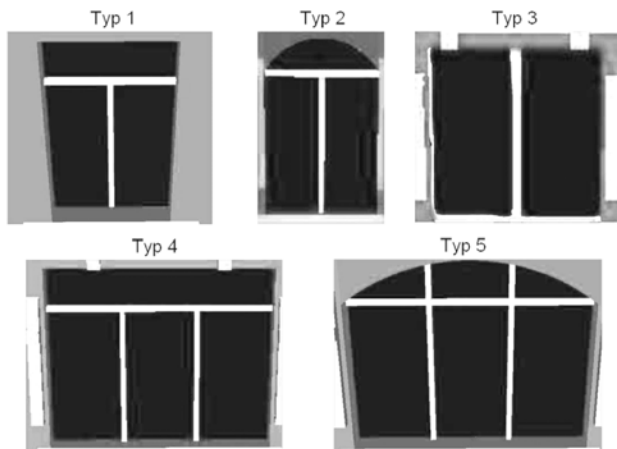


Abb. 4: Identifizierte Fenster-Prototypen

Die vom letzten Schritt der Splitgrammatik erzeugten Flächen (Symbole) werden durch Produktionsregeln in die jeweiligen Prototypen überführt. Die Wahrscheinlichkeit der einzelnen Produktionsregeln wird in erster Linie aus den absoluten Häufigkeiten des zu erzeugenden Prototyps in allen Fassadenaufnahmen hergeleitet.

Tab 2: Zuordnung von Fenstertypen je nach Breite des Fensters

<i>[schmale Fenster ≤ normale Fenster ≤ breite Fenster]</i>	
<i>schmale Fenster</i>	→ Typ 1-3
<i>normale Fenster</i>	→ Typ 1-5
<i>breite Fenster</i>	→ Typ 4-5

Darüber hinaus unterliegt die Wahl der anzuwendenden Produktionsregel dem Kontext, der durch die Geometrie des Elternknotens im Ableitungsbaum definiert ist. So ist die Wahl eines bestimmten Fenster-Prototypens von der Breite des ihn umgebenden Fassadenteils abhängig. Tabelle 2 veranschaulicht dies. Durch die angeführte Bedingung wird ausgeschlossen, dass augenscheinlich breiten Fenstertypen auf schmalen Flächen generiert werden.

Die Auswahl des Fenstertyps kann also sowohl *-ohne-* als auch *-mit-* der Betrachtung der Fensterbreite durchgeführt werden und stellt eine Art Mischform der Ansätze dar, ob bedingte oder absolute Wahrscheinlichkeiten verwendet werden.

Ein Beispiel für ein Fassadenelement welches immer ohne bedingte Wahrscheinlichkeiten betrachtet wird, ist die Auswahl des Geländers an der Eingangstreppe. Ein Treppengeländer kann entweder *-gar nicht-*, *-links-*, *-rechts-* oder *-links und rechts-* vorhanden sein. Die Auswahl wird hierbei unabhängig von anderen geometrischen Eigenschaften getroffen und ist nur von den absoluten Wahrscheinlichkeiten abhängig.

Die Erstellung einer Grammatik zur automatischen Generierung regions- und stil-typischer 3D-Modelle wird zusammenfassend mit zwei Ansätzen fließenden Übergangs umgesetzt. Während bei eher groben Fassadenstrukturen die hierarchische Zerlegung durch Splitgrammatiken verwendet wird, müssen bei steigendem Detaillierungsgrad auf Grund nicht identifizierbarer bedingter Wahrscheinlichkeiten, Fassadenelemente durch generalisierte und katalogisierte Prototypen verteilungstreu dargestellt werden.

### 3.3 Implementierung

Zur Implementierung der Grammatik wurde das von den Autoren mitentwickelte Projekt XGep (<http://www.igg.uni-bonn.de/xgep>) verwendet. XGep besteht aus einem XML Schema für Grammatiken und einer grafischen Oberfläche zum Editieren, Prozessieren und Visualisieren attributierter, probabilistischer Grammatiken. Die hier vorgestellte Grammatik wurde in einem entsprechenden XML-Dokument definiert. Es wurden Ableitungsbäume mit zufälligen Startwerten (Fassadenmaße) generiert und geometrisch interpretiert. Letzteres überführt die Lage- und Formparameter (Attribute) der Symbole in eine dreidimensionale, visualisierbare Form wie X3D oder KML. Jedes Blatt des Ableitungsbaums repräsentiert ein bestimmtes Gebäudeteil, die Gesamtheit aller Blätter stellt also das gesamte Gebäude dar. Die inneren Knoten zeigen ausschließlich die „Entstehung“ der Gebäudeteile und somit ihre Semantik.

Zur Positionierung einzelner Fassadenelemente in der 3D-Darstellung werden die Attribute der Lage- und Formbeschreibung der Symbole verwendet. Ausgehend von einem Ursprung der Fassade in der linken unteren Ecke und einem gewählten rechtwinkligen Koordinatensystem, werden alle Elemente absolut in diesem System beschrieben. Jedes Fassadenelement verwendet dabei drei Attribute zur Position (x, y und z), drei zur Dimension (Länge, Breite und Tiefe im Bezug auf das Ursprungssystem) und eins zur Rotation um die Hochachse der Fassade. Weitere Rotationen werden bei der symbolischen Zerlegung der Fassade nicht definiert, da sie in der Fassadengeometrie des regionstypischen Stils der Bonner Südstadt nicht vorkommen.

Die vorgestellte Grammatik kann insbesondere zur Verfeinerung und Veredlung detailarmer 3D- Stadtmodelle verwenden werden. Im Folgenden wird dies für eine Datenbank mit LoD 1 Modellen der Bonner Südstadt skizziert. Abbildung 5 zeigt ein Ablaufschema.



Abb. 5: Ablaufschema zur Generierung hoch detaillierter Fassaden auf Basis einer Datenbank

Zunächst ist eine kleine Modifizierung der oben beschriebenen Grammatik notwendig. Die Startwerte, also die Attribute des Startsymbols wie Lage, Breite und Höhe der Fassade, werden nicht mehr zufallsbedingt erzeugt, sondern sequenziell für jedes Gebäude aus der Datenbank abgefragt. Aus der Datenbank werden also der Grundriss eines Gebäudes (Lage, Breite und Tiefe) und die entsprechenden Höhe entnommen und der Grammatik als Input übergeben. Durch Ableitung der Grammatik, beginnend mit diesen Startwerten, wird das Gebäudemodell so artifiziell verfeinert

Abbildung 6 zeigt auszugsweise das so erzeugte, hoch detaillierte 3D Stadtmodell im regionstypischen Stil der Bonner Südstadt.

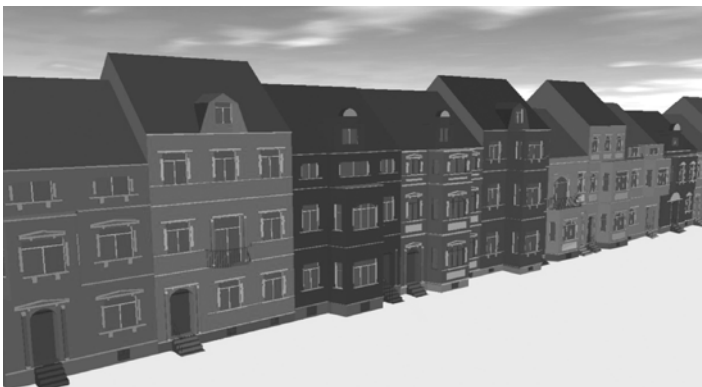


Abb. 6: Generiertes 3D Modell eines Straßenzugs der Bonner Südstadt

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die Verwendung synthetischer Fassaden zur artifiziellen Erhöhung des Detaillierungsgrads von 3D-Stadtmodellen vorgestellt. Am Beispiel der markanten Gründerzeit-Gebäude der Bonner Südstadt wurde eine attributierte Grammatik entwickelt, die die Fassaden existierender Gebäudemodelle geometrisch und semantisch verfeinert. Die Produktionsregeln

und semantischen Regeln der Grammatik basieren auf der Auswertung terrestrischer Bilder. Die so ermittelten Grenzwerte und Wahrscheinlichkeiten steuern die Prozessierung der Grammatik. Die Prozessierung der Grammatik ist in zwei Phasen zu unterteilen: In der ersten Phase wird die Fassadenfläche im Sinne von Splitgrammatiken in Stockwerke und Erker zerlegt. In der zweiten Phase werden Produktionsregeln durch die zugrunde liegenden Verteilungen so gesteuert, dass die Terminalsymbole (Türen, Fenster, Ornamente usw.) innerhalb einer Fassade und zwischen unterschiedlichen Gebäuden entsprechend variieren. Die iterative Anwendung des vorgestellten Verfahrens auf eine 3D-Stadtmodell-Datenbank wurde ebenfalls vorgestellt.

In zukünftigen Arbeiten sollte die Modellierbarkeit anderer Gebäudetypen mit der vorgestellten Art von Grammatik untersucht werden. Da die Gebäude der Bonner Südstadt durch wenige Regeln beschrieben werden können, ist zu prüfen, ob auch andere Arten von Gebäuden, Stilepochen oder Stadtteilen derart modelliert werden können. Liegt erst einmal ein umfangreicher Datenbestand von Grammatikregeln bzw. modellierter Gebäudetypen vor, so sollten diese Gebäudetypen automatisiert oder semi-automatisch in 3D-Stadtmodellen identifiziert werden.

## Anmerkung

Die hier vorgestellten Ergebnisse stammen aus einer Bachelorarbeit des ersten Absolventenjahrgangs des Bachelor-Studiengangs Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn. Die vollständige Arbeit ist unter folgender Adresse verfügbar:

[http://www.ikg.uni-bonn.de/uploads/tx\\_ikgpublication/BachelorarbeitMartin\\_Krueckhans.pdf](http://www.ikg.uni-bonn.de/uploads/tx_ikgpublication/BachelorarbeitMartin_Krueckhans.pdf)

## Literaturverzeichnis

- AHO, A. V.; SETHI, R. & ULLMAN, J. D., 1999: Compilerbau, Teil 1. Oldenbourg.
- BAUER, M.; COORS, V. & ZIPF, A., 2008: Zur Nutzung von 3D-Stadtmodellen für mobile Navigationssysteme. In: 2008: Proceedings of GI Days, Münster, 2008.
- CHOMSKY, N., 1956: Three models for the description of language. *Information Theory, IEEE Transactions*, **3** (2), S. 113-124.
- CHOMSKY, N., 1959: On Certain Formal Properties of Grammars. *Information and Control* (2), S. 137-167.
- COORS, V., 2008: Synthetic Textures for 3D Urban Models in Pedestrian Navigation. In: BRANKI ET AL 2008: Techniques and Applications for mobile Commerce, Proceedings of TAMoCo 2008, S. 46-53.
- DÖLLNER, J.; BUCHHOLZ, H.; NIENHAUS, M. & KIRSCH, F., 2005: Illustrative Visualization of 3D City Models. In: ROBERT F. ERBACHER; JONATHAN C. ROBERTS; MATTI T. GROHN; KATY BORNER 2005: Proceedings of Visualization and Data Analysis 2005 (Electronic Imaging 2005, January 16-20, 2005, San Jose, California, USA), S. 42-51.
- DUARTE, J. P., 2002: Malagueira Grammar - towards a tool for customizing Alvaro Siza's mass houses at Malagueira.
- JOBST, M.; KYPRIANIDIS, J. E. & DÖLLNER, J., 2008: Mechanisms on Graphical Core Variables in the Design of Cartographic 3D City Presentations. In: MOORE; DRECKI 2008: Geospatial Vision, S. 45-59.
- KNUTH, D. E., 1968: Semantics of context-free languages. *Theory of Computing Systems*, **2** (2), S. 127-145.



- KNUTH, D. E., 1971: Top-down Syntax Analysis. *Acta Informatica*, **2** (1), S. 79-110.
- LÄBE, T. & FÖRSTNER, W., 2006: Automatic Relative Orientation of Images. In: 2006: Proceedings of the 5th Turkish-German Joint Geodetic Days.
- LARIVE, M. & GAILDRAT, V., 2006: Wall grammar for building generation. In: 2006: GRAPHITE '06: Proceedings of the 4th international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and Southeast Asia, S. 429-437.
- MÄNTYLÄ, M., 1988: An Introduction to Solid Modeling. Principles of Computer Science. Computer Science Press.
- MÜLLER, P.; WONKA, P.; HAEGLER, S.; ULMER, A. & VAN GOOL, L., 2006: Procedural Modeling of Buildings. In: 2006: Proceedings of ACM SIGGRAPH 2006 / ACM Transactions on Graphics (TOG) ACM Press, S. 614-623.
- WONKA, P.; WIMMER, M. & WILLIAM, F. S., 2003: Instant Architecture. *ACM Transactions on Graphics*, **4** (22), S. 669-677.

## Konzept und Struktur eines Monitors der Siedlungs- und Freiraumentwicklung

GOTTHARD MEINEL<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Mit dem Ziel, die tägliche Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche auf 30 ha im Jahre 2020 zu begrenzen, steigen die Anforderungen an Flächenberichtssysteme. Derzeit steht dazu ausschließlich die amtliche Flächenstatistik zur Verfügung, die die Flächenentwicklungstendenzen nur als Mengenbilanz stark verzögert, mit großen Unsicherheiten und auch nur aggregiert bis auf Gemeindeebene wiedergibt. Diese Flächenstatistik ist unzureichend, die Komplexität der Flächeninanspruchnahme und ihrer Veränderungen und Folgen für Infrastruktur, Landschaft, Böden, Erholungs- und Schutzgebiete zu beschreiben. Darum wird das Konzept eines räumlich hochdifferenzierten quantitativ-qualitativen Flächenmonitorings vorgestellt. Es basiert auf dem ATKIS Basis-DLM und statistischen Daten, welches automatisiert ausgewertet werden. Die Ergebnisse werden in Kartenform im Internet visualisiert.*

### 1 Problemstellung

Ein sparsamer und schonender Umgang mit der begrenzten Ressource Fläche ist ein Kernelement der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie (u. a. DOSCH, 2007). Zentrales Ziel der Flächenhaushaltspolitik der Bundesregierung ist die Verminderung der Flächeninanspruchnahme für Siedlung und Verkehr auf 30 ha/Tag bis 2020. Derzeit steht aber die Ampel für den Indikator Flächeninanspruchnahme auf Rot (RNE, 2008). Ein nicht unwichtiger Grund der Zielverfehlung ist die derzeit ungenügende Messbarkeit der Flächenentwicklung sowohl hinsichtlich Messgüte als auch Zielschärfe. Denn die amtliche Flächenstatistik ist mit einer Vielzahl von Problemen behaftet, die die Belastbarkeit für Aussagen hinsichtlich der Veränderungstendenzen sehr deutlich einschränken (STATISTISCHES BUNDESAMT 2008):

- Die Aktualität der Flächenstatistik ist stark eingeschränkt. Im Fall großer und damit bilanzwirksamer Veränderungen wie Flurneuordnungsverfahren, Infrastrukturmaßnahmen (z. B. Straßenbau), Renaturierungen von Bergbauflächen oder der Konversion von militärisch genutzten Flächen erfolgt der Katastereintrag teilweise erst viele Jahre nach Nutzungsänderung.
- Viele technologische Änderungen der Datengrundlage von COLIDO über das Amtliche Liegenschaftsbuch, das automatische Liegenschaftsbuch bis hin zum zukünftigen AAA-Modell bedingen Brüche in den Bilanzen, die die Berechnung von Zeitreihen extrem erschweren. Nach Berichtigungen sind diese nur noch aggregiert auf Bundeslandebene belastbar.
- Durch die flurstücksbezogene Sicht auf die Fläche wird eine Differenzierung der tatsächlichen Bodenbedeckung unmöglich. So können weder die tatsächlich überbaute Fläche noch Gebäude mit ihrer Geschossigkeit betrachtet werden.

---

<sup>1</sup> Gotthard Meinel, Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V., Weberplatz 1, 01217 Dresden, E-Mail: G.Meinel@ioer.de

- Die amtliche Flächenstatistik ermöglicht keine Bilanzierung der Flächennutzungsänderung (von-nach), sondern nur die Bilanzierung der Bestandssituation. Ob z. B. hochwertiger, schützenswerter Boden überbaut wurde, ist nicht feststellbar.
- Es sind keinerlei Aussagen über die Lage neuer Gebäude im Siedlungsgefüge möglich. Gerade aber die Bilanzierung der Innen- im Verhältnis zur Außenentwicklung ist unabdingbar für die Bewertung der Nachhaltigkeit der Siedlungsentwicklung.
- Die Flächenstatistik ist stark verzerrt durch die undifferenzierte Eingliederung von Bergbaufolgelandschaften in Erholungs- und damit in Siedlungs- und Verkehrsflächen (SuV). Auch bleiben SuV-Flächen in Land- und Forstwirtschaft (asphaltierte Wege, Biomasse-Anlagen usw.) in dem SuV-Wert unberücksichtigt. Diese Verzerrung ermöglicht nur eine sehr eingeschränkte Bewertung des Nachhaltigkeitsgrades der Flächenentwicklung.
- Der amtlichen Flächenstatistik liegt das Amtliche Liegenschaftsbuch mit seinen Angaben zur Flächengröße des Grundstücks und seiner Nutzung zugrunde. Gerade aber die Nutzungsangaben sind teilweise unrichtig, da sie bei Nutzungsänderungen teilweise nicht aktualisiert wurden.

Andererseits stehen digitale Geobasisdaten wie die Automatisierte Liegenschaftskarte (ALK) als Weiterentwicklung des Amtlichen Liegenschaftskataster-Informationssystem (ALKIS) sowie das Amtlich-Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS) zur Verfügung, welche Grundlage für ein hochgenaues Flächenmonitoring sein können (MEINEL, 2008). Diese mit sehr hohem Aufwand und Kosten durch die Landesvermessungsämter erstellten Datenbasen könnten in Zukunft durch die Nutzung auch für ein Flächenmonitoring besser in Wert gesetzt werden.

## 2 Ziele des Monitors

Der im Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V. im Aufbau befindliche Monitor soll die Siedlungs- und Freiraumentwicklung räumlich sehr hochauflösend auf Grundlage von fortschreibungsgesicherten, topographischen Geobasisdaten beschreiben. Er soll erstmals eine Bewertung des Nachhaltigkeitsgrades der Entwicklung auch für kleine Teilräume ermöglichen. Dazu wird vor allem auch eine qualitative Flächenbewertung der Siedlungsnutzung und der Freiraumqualitäten vorgenommen.

Alle Indikatoren werden in hoher räumlicher Auflösung berechnet und, vergleichend zusammen mit den Vorwerten, als Trendinformation visualisiert. Grundlage der Indikatoren der Siedlungsentwicklung ist das Gebäude mit seinem Grundriss. Nur durch diese hochauflösende Betrachtung können u. a. Fragen nach dem Verhältnis von Innen- zur Außenentwicklung, nach der Bebauungsdichte und der Siedlungsstruktur allgemein beantwortet werden.

Aufbauend auf den Gebäudegrundrissen werden baublockscharf Indikatoren wie z. B. der Überbauungs-, die Geschossflächen- und die Gebäudevolumendichte berechnet. Für die Berechnung derartiger siedlungsstruktureller Parameter kann auf ein Programmsystem namens SEMENTA® (MEINEL et al. 2008) aufgebaut werden (siehe Kapitel 4).

Die Freiraumentwicklung wird durch Indikatoren wie der Naturnähe der Flächennutzung, dem Anteil Siedlungs- und Verkehrsfläche in schutzwürdigen Landschaft, die Entwicklung landschaftsfremder Elemente in schutzwürdigen Landschaften, die Flächeninanspruchnahme in

Tab. 1: Ausgewählte, geplante Indikatoren des Monitors der Siedlungs- und Freiraumentwicklung

Indikator	Kurzbeschreibung/Beispiele
<b>Siedlungsindikatoren (Beispiele)</b>	
Siedlungs- und Verkehrsfläche (qualifizierter SuV-Wert)	Gegenüber dem alten SuV-Wert werden hier auch SuV-Flächen in Landwirtschaft und Forst berücksichtigt, Erholungsflächen werden differenziert behandelt
Siedlungsflächenanteil differenziert nach Nutzungsarten	u. a. baulich geprägte, Wohnbau, Industrie- und Gewerbe, gemischte Nutzung, besondere funktionale Prägung
Siedlungsfreiflächenanteil	Sportanlage, Friedhof, Grünanlage, Sportplatz, Freizeit
Gebäudedichte	Anzahl Gebäude pro ha Blockfläche
Gebäudegrundflächendichte	Anteil der Gebäudegrundfläche an der Blockfläche (=überbauter Flächenanteil)
Geschossflächendichte	Anteil der Geschossfläche (überbaute Fläche * Geschosszahl) an der Blockfläche
Gebäudevolumendichte	Verhältnis vom Gebäudevolumen zur Blockfläche in m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
Wohnungsdichte	Wohnungszahl pro ha Blockfläche
Einwohnerdichte	Einwohnerzahl pro ha Blockfläche
Gebäudebezogene Siedlungsdichte	Einwohner pro Gebäudefläche
Bodenversiegelung	Gebäude- und Straßenfläche/Bezugsfläche
Kompaktheitsgrad	Zerklüftungsgrad stellvertretend für Kompaktheitsmaße
Vernetzungsgrad	Vernetzungsgrad unterschiedlicher Flächennutzungsarten (Grün mit Bebauung und Industrie/Gewerbe mit Wohnen)
Flächenproduktivität	Bruttowertschöpfung pro Industrie- und Gewerbegebäudefläche einschließlich Mischnutzungsanteil
Nutzungsdichte	Einwohner und Beschäftigte je ha Gebäudefläche
Hochwassergefährdete Siedlungsflächen	Gebäudezahl und -fläche in Überschwemmungsgebieten einschließlich deren Veränderung
<b>Freiraumindikatoren (Beispiele)</b>	
Naturnähe der Flächennutzung	Anteil bzw. Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche in schutzwürdigen Landschaft, Zunahme landschaftsfremder Elemente in schutzwürdigen Landschaften
Differenzierte Schutzgebietsanteile	Anteil Schutzgebietsfläche unter Beachtung von Überlagerungen (Nationalpark, Naturschutzgebiet, geschützter Landschaftsbestandteil, Landschaftsschutzgebiet, Naturpark, Biosphärenreservat, Vogelschutzgebiete, Flora-Fauna-Habitat-Gebiet, Wasserschutzgebiet, Natura2000-Gebiete)
Naturnähe der Freiräume	Bewertung der Freiräume nach Naturnähe aus Flächennutzung und Wertstufen der Naturnähe
Überbauung fruchtbarer Böden	Anteil fruchtbarer Böden
Biotopstruktur	Dichte von Landschaftselementen im Offenland
Lärmkorridore	Fläche in abgestuften Lärmbändern und deren Freiraumanteil
Nutzungsdruck auf Schutzgebiete	Gebäudezahl und -fläche in Schutzgebieten, Straßennetz in Schutzgebieten (Grad der Zerschneidung)
Beeinträchtigung Erholungsgebiete	Anteil die naturnahe Erholung störender Flächennutzungen, Anteil erholungsrelevanter Nutzungstypen in ausgewiesenen Erholungsgebiet

Schutzgebieten, die Durchlässigkeit des Verkehrsnetzes (zur Qualifizierung der Beschreibung unzerschnittener Räume), die Intensität der Flächennutzung, die Dichte von Landschaftselementen im Offenland, die Flächeninanspruchnahme auf Böden mit hoher natürlicher Ertragsfähigkeit und die Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung in Überschwemmungsgebieten beschrieben. Eine Auswahl der geplanten Indikatoren, die auch einige des Nachhaltigkeitsbarometers Fläche (SIEDENTOP, HEILAND, LEHMANN, 2007) umfassen, zeigt Tab.1.

Der Monitor Siedlungs- und Freiraumentwicklung wird die Flächennutzungssituation und ihre Entwicklung damit quantitativ und qualitativ wesentlich genauer darstellen, als die derzeitige amtliche Flächenstatistik. So wird die kleinste Raumeinheit bei einigen Indikatoren der Block sein gegenüber den nur ab Gemeindeebene erhältlichen Daten der Flächenstatistik. Das ermöglicht u. a. auch die teilträumliche Beurteilung der Entwicklung innerhalb kreisfreier Städte. Auch wird die Fläche nach ihrer tatsächlichen Bedeckung durch genaue Flächendifferenzierung (Gebäude, Straßen-, Vegetationsfläche usw.) und nicht nach ihrer grundstücksbasierten Nutzung ausgewertet.

Der Monitor wird unter Berücksichtigung der europäischen Richtlinie zum Aufbau einer Geodateninfrastruktur (INSPIRE) angelegt. Damit ist eine standardisierte Metabeschreibung der Daten einschließlich der externen Öffnung des Metadatenkatalogs für eine europaweite Nutzung verbunden.

Ergänzend zu der amtlichen Flächenstatistik sind durch das neuartige Flächenmonitoring zusammenfassend folgende Aussagen möglich:

- Durch die geometrische Darstellung der Gebäudegrundrisse, der Straßenflächen, der landwirtschaftlichen und der Wald- und Wasserflächen sind viel genauere Flächenbilanzen möglich als durch die katasterbasierte Flächenbilanzierung.
- Durch den Vergleich von digitalen Datensätzen unterschiedlicher Jahre sind Veränderungsbilanzierungen genauer möglich, als mit der derzeitigen Flächenstatistik, da es bei ATKIS im Gegensatz zu ALB/ALK/ALKIS keine technologischen Brüche gibt.
- Durch die Lageinformation von Gebäuden und anderen Flächen kann mittels Geoinformationssystem eine räumliche Analyse erfolgen. So ist es z. B. möglich zu bilanzieren, ob sich neue Gebäude- bzw. Siedlungsflächen im Bestand (Innenentwicklung) oder auf der Grünen Wiese (Außenentwicklung) entwickelten.
- Durch Verknüpfung der Geometrie mit kleinräumigen (gemeindebezogenen) Statistikdaten sind kleinteilige Analysen auch auf Ortsteilebene möglich, denn für viele Fragestellungen ist die Gemeindeebene nicht genügend räumlich auflösend.

### **3 Datengrundlagen**

Die in den letzten 10-20 Jahren erarbeiteten digitalen Geobasisdaten werden in fachlichen Prozessen noch ungenügend angewandt, obwohl diese mit sehr hohem finanziellem Aufwand erhoben wurden und deren Nutzung auch für das Flächenmonitoring viele Vorteile verspricht. So ist deren Fortführung durch gesetzlichen Auftrag langfristig und deutschlandweit gesichert und die Daten liegen digital vor (GISready). Gründe für die noch geringe Anwendung von

Geobasisdaten sind in teilweise noch bestehenden Inkonsistenzen und einzelnen Qualitätsmängeln zu suchen (MEINEL, KNOP, HECHT, 2008). Letztlich erzwingt auch die Umstellung des Drucks der topographischen Kartenwerke auf Grundlage des ATKIS Basis-DLMs eine immer höhere Aktualität und Qualität dieser digitalen Geobasisdaten.

Grundlage des Monitors ist das ATKIS Basis-DLM. Dieses im Maßstab 1:10.000 erhobene Landschaftsmodell grenzt die Nutzungsflächen geometrisch ab und weist die Nutzung der verschiedenen Flächen aus (AdV, 2003). Für den Monitor sind die Objektbereiche Siedlung (2000), Verkehr (3000), Vegetation (4000) und Gewässer (5000) interessant. Für die Bestimmung siedlungsstruktureller Kennzahlen werden die Objektarten Wohnfläche (2111), Industrie- und Gewerbefläche (2112), Fläche gemischter Nutzung (2113) und Fläche besonderer funktionaler Prägung (2114) genutzt.

Für die Berechnung vieler Indikatoren ist eine gebäudescharfe Analyse der Siedlungsstruktur erforderlich. Nur so können z. B. das Verhältnis von Bauen im Innen- gegenüber dem Außenbereich, die Siedlungsdichte oder die Bautätigkeit in Schutz- oder Überschwemmungsgebieten abgebildet und beurteilt werden. Da der Gebäudebestand erst mit der Migration des ATKIS Basis-DLMs in das AAA-Modell vollständig flächig abgebildet wird, wird derzeit noch der Gebäudegrundriss aus der Topographischen Karte 1:25.000 (DTK25) entnommen. Diese zeigt den Gebäudebestand flächenhaft und nur wenig generalisiert. Derzeit muss für den Monitor noch mit der vorläufigen Kartengrafik (DTK25-V) gearbeitet werden, die den Gebäudebestand im Grundrisslayer der digitalen Rasterkarte zusammen mit Vegetations-, Verkehrs- und Schriftsignaturen zeigt. Dieses erzwingt die Separation aller Gebäude aus dem binären Rasterlayer. Sukzessiv wird seitens der Landesvermessungsämter auf die neue Kartengrafik umgestellt, die die Gebäude in einem extra Layer und hoher Digitalisierungsqualität enthält.

Die Arbeit mit dem ATKIS-Basis DLM bedingt derzeit einige Probleme. So sind die Daten teilweise noch nicht blattschnittfrei, viele Attributwerte fehlen (noch) und selbst der Layer Verwaltungseinheit (geb03) erfordert erhebliche Nacharbeiten. Während diese Unzulänglichkeiten seitens der Datenanbieter sukzessiv behoben werden, ist die nicht redundanzfreie Darstellung der Fläche (In ATKIS sind Flächenüberlagerungen erlaubt) sowie die vorwiegend linienhafte Modellierung von Straßen wesentlich problematischer. Diese erfordert zur Berechnung der Verkehrsfläche beispielsweise eine Pufferung mit dem Attribut „Breite der Fahrbahn“ (BRF), was aber in vielen Bundesländern noch nicht vollständig vergeben ist.

Für den Monitor werden neben den Geobasisdaten auch Statistikdaten der Bundes- und der Länderstatistik, der Umweltbeobachtung und der Planung verwendet (u. a. die Datenbanken Statistik regional, Statistik lokal, INKAR und GENESIS).

## 4 Berechnung siedlungsstruktureller Kennzahlen

Die in dem Monitor konzipierte Flächennutzungsanalyse in sehr hoher räumlicher Auflösung für die gesamte Bundesrepublik kann nur durch eine weitestgehende automatisierte Berechnung erfolgen. U. a. wird dazu das im Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung entwickelte Programm SEMENTA® (SettlementAnalyzer) eingesetzt, welches die automatische Erhebung der Siedlungsstruktur auf Basis der Topographischen Karte 1:25.000 (DTK25 oder DTK25-V)

und des ATKIS Basis-DLM ermöglicht. SEMENTA® extrahiert den Gebäudebestand, beschreibt diesen durch eine große Zahl von Parametern, die Grundlage für die Klassifikation der Gebäude und der Baublockstruktur ist, und bestimmt damit ein Set siedlungsstruktureller Kennwerte. Diese baublockscharf ermittelten Kennwerte sind für viele mittelmaßstäbige Planungsprozesse (z. B. Regional-, Infrastruktur- und Bundesverkehrswegeplanung) von Bedeutung und beschreiben die Siedlungsstruktur sehr genau. Wird diese Erhebung nun wiederholt auf Kartenmaterial unterschiedlicher Zeitpunkte angewandt, so ist ein Vergleich der Siedlungsentwicklung bis auf Baublock- bzw. Gebäudeebene und damit ein hochleistungsfähiges Flächenmonitoring möglich. SEMENTA® berechnet die folgenden Kennzahlen für jedes Gebäude bzw. jeden Block innerhalb des Untersuchungsgebietes:

- Gebäudetyp (7 Wohngebäude- und 2 Nichtwohngebäudetypen)
- Baublocktyp (7 Wohngebäude- und 2 Nichtwohngebäudetypen)
- Anzahl der Gebäude (Anzahl der Gebäude im Block)
- Gebäudedichte (Anzahl der Gebäude pro Hektar Blockfläche)
- Gebäudegrundfläche (Summe der Gebäudegrundflächen im Block in m<sup>2</sup>)
- Gebäudegrundflächendichte (Anteil der Gebäudegrundfläche an der Blockfläche)
- Mittlere Geschosshöhe (Gewichteter Mittelwert der Anzahl der Geschosse aller Gebäude im Block unter Berücksichtigung der Gebäudetypflächenanteile)
- Geschossfläche (Summe aller Gebäudegrundflächen multipliziert mit der mittleren Geschosshöhe in m<sup>2</sup>)
- Geschossflächendichte (Anteil der Geschossfläche an der Blockfläche, vergleichbar mit der Geschossflächenzahl GFZ, aber Bezug auf Blockfläche)
- Gebäudevolumen (Summe aller Einzelgebäudevolumen im Block in m<sup>3</sup> (wird berechnet aus der Gebäudegrundfläche und regional differenzierten gebäudetypabhängigen Geschosshöhen und -höhen)
- Gebäudevolumendichte (Verhältnis vom Gebäudevolumen zur Blockfläche in m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)
- Wohnungszahl (blockbezogener Schätzwert im Block ausgehend von Gebäudetyp, -fläche und Geschosshöhe)
- Wohnungsdichte (Wohnungszahl pro Hektar Blockfläche)
- Einwohnerzahl (blockbezogener Schätzwert ausgehend von Gebäudetyp, -fläche und Geschosshöhe)
- Einwohnerdichte (Einwohnerzahl pro Hektar Blockfläche).

Das Programmsystem kann in der Erweiterung SEMENTA®-CHANGE inzwischen auch gebäudescharfe Siedlungsentwicklungen berechnen. Dazu wird die Deckung der Einzelgebäude geprüft und daraus Informationen zu Gebäudeneubau oder -abriss abgeleitet (HECHT, R.; HEROLD, H.; MEINEL, G, 2008).

## 5 Visualisierung und Ausblick

Die Ergebnisse des Monitors werden in Kartenform im Internet visualisiert. Dabei wird entsprechend der unterschiedlichen Nutzeranforderungen zwischen einem Quickviewer auf SVG-Basis und einem leistungsfähigeren Viewer auf WebGIS-Basis unterschieden. Der Quickviewer ermöglicht die Visualisierung der Indikatorwerte nach Wahl der

Untersuchungsregion und des Indikator auf extrem einfache Weise, so dass keine Hemmschwellen auch für sehr eilige Nutzer bestehen. Mit einem komfortablen Viewer auf WebGIS-Basis können wesentlich mehr Detailinformationen interaktiv visualisiert werden (Zoomfunktion, Themenüberlagerungen usw.). Für eine verbesserte Ergebnisinterpretation ist die Visualisierung von Google-Maps-Daten möglich. Noch 2009 sollen erste Ergebnisse des Monitors der Siedlungs- und Freiraumentwicklung im Internet veröffentlicht werden.

## 6 Literaturverzeichnis

- ARBEITSGEMEINSCHAFT DER VERMESSUNGSVERWALTUNGEN DER LÄNDER DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (AdV), (2003): Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem ATKIS, Objektartenkatalog (ATKIS – OK), Teil D0-Erläuterungen zu allen Teilkatalogen (Version 3.2), ([www.atkis.de](http://www.atkis.de))
- DOSCH, F., (2008): Siedlungsflächenentwicklung und Nutzungskonkurrenzen, Schwerpunkt: Flächennutzungskonflikte – Ursachen, Folgen und Lösungsansätze, in: TECHNIKFOLGENABSCHÄTZUNG – Theorie und Praxis, Hrsg: Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), Nr. 2, 17. Jahrgang - September 2008, S. 41-51
- HECHT, R.; HEROLD, H. & MEINEL, G., (2008): Gebäudescharfe Analyse der Siedlungsentwicklung auf Grundlage mittelmaßstäbiger Karten, In: Angewandte Geoinformatik 2008 (AGIT2008), Hrsg. Strobl, Blaschke, Griesebner, S. 11-17, 2008
- MEINEL, G.; KNOP, M. & HECHT, R., (2008): Qualitätsaspekte und Verfügbarkeit digitaler Geobasisdaten in Deutschland unter besonderer Berücksichtigung des ATKIS® Basis-DLM und der DTK25(-V), PFG 1/2008, S. 29-40
- MEINEL, G.; HECHT, R.; HEROLD, H. & SCHILLER, G., (2008): Automatische Ableitung von stadtstrukturellen Grundlegendaten und Integration in einem Geographischen Informationssystem, Forschungen Heft 134, Herausgeber BBR, Bonn, ISSN 1435-4659 (Schriftenreihe), ISBN 978-3-87994-466-8, 98 Seiten, 2008
- MEINEL, G.; ENGEL, M. & KLEBER, A., 2007: Prozessierung eines deutschlandweiten ATKIS Basis-DLMs als Grundlage eines Monitors der Siedlungs- und Freiraumentwicklung, In: Angewandte Geoinformatik (AGIT2007), Hrsg. Strobl, Blaschke, Griesebner, S. 34-40
- RNE-RAT FÜR NACHHALTIGE ENTWICKLUNG, (2008): Welche Ampeln stehen auf Rot? Stand der 21 Indikatoren der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie – auf der Grundlage des Indikatorenberichts 2006 des Statistischen Bundesamtes. Stellungnahme des Rates für Nachhaltige Entwicklung, Berlin
- SIEDENTOP, S.; HEILAND, S. & LEHMANN, I., (2007): Regionale Schlüsselindikatoren nachhaltiger Flächennutzung für die Fortschrittsberichte der Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie (Nachhaltigkeitsbarometer Fläche), Forschungen, Heft 130, Hrsg.: BMVBS/BBR, Bonn
- STATISTISCHES BUNDESAMT, (2008): Qualitätsbericht zur Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung - Jährliche Erhebung der Siedlungs- und Verkehrsfläche, ([www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/.../Qualitaetsbericht/.../Siedlverkehrsflaeche,property=file.pdf](http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/.../Qualitaetsbericht/.../Siedlverkehrsflaeche,property=file.pdf))
- STATISTISCHES BUNDESAMT, (2007): Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung Wiesbaden





## Spektrometrische Methoden als Grundlage für eine bedarfsgerechte Bewirtschaftung im Futterbau

THOMAS FRICKE<sup>1</sup>, SONJA BIEWER<sup>1</sup>, DANIELA PERBANDT<sup>1</sup>,  
STEFAN ERASMI<sup>2</sup> & MICHAEL WACHENDORF<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: An landwirtschaftlichen Futterbaubeständen wurden verschiedene methodische Ansätze hyperspektraler Feldspektroskopie zur Abschätzung von Ertragsleistung und Bestandeszusammensetzung erprobt. Im Vordergrund dieser Zusammenarbeit der Universitäten Göttingen und Kassel standen Untersuchungen an Leguminosen/Gras-Gemengen unterschiedlicher Artenzusammensetzung und Phänologie, die unter Gewächshaus- und Feldbedingungen erfolgten. Neben der potentiellen Anwendung der Untersuchungsergebnisse für (in situ) Echtzeitapplikationen im teilflächenspezifischen Ackerbau, liefern die vorgestellten Studien grundlegende Erkenntnisse über das Potential spektrometrischer Messungen und Methoden für zukünftige abbildende Sensorsysteme (z. B. RapidEye, ARES, EnMAP). Der Beitrag beschreibt die Verfahren und stellt einzelne Ergebnisse vor.*

### 1 Einleitung

Pflanzenbestände weisen oft schon in der nächsten Nachbarschaft Variationen in ihren Eigenschaften auf. Die Kenntnis über die räumlich unterschiedliche Ausprägung von Ertrag und Qualität der Bestände ermöglicht eine verbesserte Einschätzung zahlreicher produktionstechnischer Größen und damit eine Optimierung des Flächen- und Betriebsmanagements. Sensorbasierte Verfahren zur Messung der Bestandeseigenschaften haben sich in Precision Farming Applikationen vor allem des Getreidebaus etabliert. Für Kulturpflanzen des Futterbaus dagegen existieren kaum Erfahrungen. Neben dem Mais gilt hier das Interesse besonders den Leguminosen/Gras-Gemengen.

Leguminosen/Gras-Gemenge haben neben der Produktion von Raufutter für Wiederkäuer eine große Bedeutung für die Bodenfruchtbarkeit und Stickstoffversorgung landwirtschaftlicher Betriebe. Innerhalb der Schläge variieren je nach Standort Wachstumsfaktoren wie Wasser- und Nährstoffversorgung in zum Teil großer Spannweite und prägen die Ertragsentwicklung, Phänologie und Bestandeszusammensetzung dieser Futterbauflächen (LEDGARD & STEELE 1992). Die standortspezifische Erfassung der genannten Bestandeseigenschaften ermöglicht ein angepasstes Management sowohl im Feld als auch in der Verwertung der Aufwüchse. Eine besondere Bedeutung nehmen hierbei die Leguminosen ein, die mit ihrer Fähigkeit Stickstoff über die Symbiose mit Rhizobien aus der Luft zu fixieren, wesentlich zur Stickstoffversorgung des Futterbaus landwirtschaftlicher Betriebe beitragen können (LEDGARD & STEELE 1992, WACHENDORF et al. 2004). So lassen Ertragshöhe und Leguminosengehalt auf die Höhe des

<sup>1</sup>)Universität Kassel, Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften

<sup>2</sup>)Universität Göttingen, Geographisches Institut

Residualstickstoffs schließen (HOGH-JENSEN et al. 2004), der im Zuge der Vorfruchtwirkung die Nährstoffversorgung der Folgefrucht prägt und nur noch überwiegend in Bereichen suboptimaler Stickstoffversorgung über eine standortspezifische Düngung ausgeglichen werden muss. Insbesondere in ökologisch wirtschaftenden Betrieben umfassen Leguminosen/Gras-Gemenge 20 – 50 % der Ackerfläche. Sie werden vornehmlich geschnitten und siliert oder frisch den Wiederkäuern direkt verfüttert, aber auch eine Beweidung der Flächen ist möglich. Bei einer Leistungsproduktion wie der Milchviehhaltung wird prioritär auf hohe Erträge bei guter Futterqualität geachtet. Während eine einmalige Erfassung von Bestandeseigenschaften zum Nutzungszeitpunkt über eine Online-Sensorik bei der Ernte möglich ist, können Fragen zur Wahl des optimalen Nutzungszeitpunktes oder des Wachstumsfortschrittes im Hinblick auf die Adaption von Managementmaßnahmen nur durch kontinuierliche Beobachtung über Satellitenplattformen erreicht werden. Für beide Anwendungsbereiche bietet die hyperspektrale Messung der Bestände eine nichtdestruktive, schnelle Methode futterwirtschaftliche Eigenschaften der Bestände zu erfassen. Zu prüfen, mit welcher Schätzgüte ausgewählte Parameter auch im Vergleich zu reduzierten Spektrenbanden wiedergegeben werden können, war Ziel dieses Vorhabens.

## 2 Untersuchungsrahmen

An der Universität Kassel wurden in zwei Gefäßversuchen und einem Feldversuch Leguminosen/Gras-Gemenge unterschiedlicher Artenzusammensetzung, bestehend aus Kombinationen eines Graspartners mit je einer Leguminosenart sowie deren Reinsaaten etabliert. Als Grasarten wurden in einem Gefäßversuch und dem Feldversuch das Deutsche Weidelgras (*Lolium perenne*) als Untergras mit höheren Blattanteilen in den unteren Straten und in einem zweiten Gefäßversuch das Welschen Weidelgras (*Lolium multiflorum* var.???) als Obergras mit ausgeprägt beblättertem Stengelanteil ausgewählt. Als Leguminosen kamen Rotklee (*Trifolium pratense*), Weißklee (*Trifolium repens*) und Luzerne (*Medicago sativa*) zum Einsatz. Die Bestände wurden entlang des Zuwachszeitraumes mit einem Feldspektrometer vom Typ FieldSpec® Pro JR (Analytical Spectral Devices, CO, USA) in 1 – 2 wöchigen Intervallen im Wellenlängenbereich zwischen 350 und 2500 nm hyperspektral gemessen. Bei den Gefäßversuchen erfolgte die Messung bei verdunkelten Bedingungen unter Verwendung einer Quartz Tungsten Halogenlampe (JCV 14.5V – 50W C) als Strahlungsquelle. Die Messungen im Feld erfolgten bei Sonnenschein im Zeitfenster 11 – 14 Uhr MEZ. Die spektrale Kalibration erfolgte kontinuierlich nach 4 bis 6 Messungen mit einem 99% Spectralon Panel (Labsphere, Inc., North Sutton, NH, USA). Nach jedem Messtermin erfolgte die Beerntung der zugehörigen Fläche, die Aufwüchse wurden in Fraktionen der Artengruppen Gräser, Leguminosen und Kräuter separiert, bei 65 °C getrocknet und der TM-Ertrag bestimmt.

Aus den hyperspektralen Datensätzen erfolgte die Erstellung verschiedener spektraler Subsets zur Prüfung der Aussagekraft von reduzierten Wellenlängenbereichen, von Kombinationen aussagekräftiger Wellenlängen und von Vegetationsindizes. Die Kalibration der Schätzgleichungen erfolgte für hyperspektrale Datensätze mit der „Modified Partial Least Square Regression“ (MPLS) (CHO et al. 2007, GELADI & KOWALSKI 1986) und die Extraktion

aussagekräftiger Wellenlängen mit der “Stepwise Multiple Linear Regression” (SMLR) unter Verwendung des Programms WinISI v. 1.63 der Fa. Infrasoftware International, LLC (WINISI III MANUAL 2005). Als Vegetationsindizes wurden der NDVI, REIP, EVI und SR ausgewählt. Nähere Informationen zu Versuchsaufbau, Messmethoden und Auswertung sind bei BIEWER et al. (2007) sowie BIEWER et al. (2008) aufgeführt.

### 3 Trockenmasse-Erträge

Wesentliche Kenngröße für die Produktivität einer Futterbaufläche ist der Trockenmasseertrag. Das Hauptziel des Vorhabens galt daher der Untersuchung von Beziehungen spektraler Signaturen von Leguminosen/Gras-Gemengen zu deren Trockenmasseerträgen entlang eines weiten Gradienten von Leguminosenarten, deren Anteilen im Bestand und dem Bestandesalter. Die Schätzgüte hyperspektraler Daten erreichte in Gefäßversuchen mit gut entwickelten Beständen nach Kreuzvalidierung Bestimmtheitsmaße  $r^2 \geq 0.95$  (Abb. 1). Bei in der Praxis unüblichen hochwüchsigen Beständen geringer Triebdichte und zunehmendem Anteil der Bodensignatur lagen die Bestimmtheitsmaße zwischen  $r^2 = 0.59$  und  $r^2 = 0.82$  (BIEWER et al. 2008). Im Feldversuch konnten bei vollem Spektrum (MPLS) und selektierten Wellenlängen

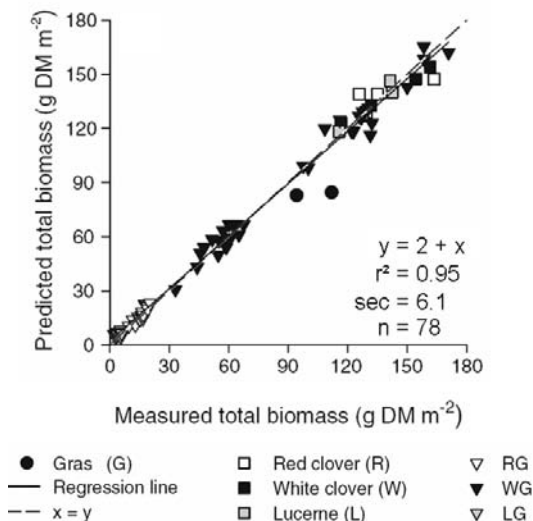


Abb. 1: Geschätzte und gemessene Trockenmasseerträge von Leguminosen/Gras-Gemengen und deren Reinsaaten bezogen auf eine mit MPLS erstellte Kalibration auf Basis aller erhobenen Proben eines Gefäßversuches (Quelle: BIEWER et al. 2008, verändert)

(SMLR) Bestimmtheitsmaße von  $r^2 = 0.73 - 0.93$  erreicht werden. Eine Reduktion des Wellenlängenbereichs auf 620 – 1000 nm führte zu einer geringeren Schätzgüte mit

Bestimmtheitsmaßen von  $r^2 = 0.58 - 0.88$ . Bei gleichem Graspartner zeigten spezifisch auf Leguminosenarten ausgerichtete Kalibrationen eine höhere Güte der Abschätzung von Erträgen. Vegetationsindizes erreichten in den gut entwickelten dichten Beständen der Gefäßversuche ebenfalls Bestimmtheitsmaße von  $r^2 = 0.87 - 0.98$ . In den Feldbeständen dagegen konnten nur Werte von  $r^2 = 0.1$  bei Einbindung aller Bestände und bis  $r^2 = 0.8$  in Reinsaaten erreicht werden. In artspezifischen praxisüblichen Beständen (Datensätze aus Reinsaaten von Leguminosen- und Grasart sowie deren Mischung) wurden Werte von  $r^2 = 0.44$  nicht überschritten. Ein Vegetationsindex mit besonderer Aussagekraft konnte nicht ermittelt werden. Im Freiland tendierte der REP für praxisübliche Bestände zu einer besseren Abschätzung.

Gegenüber den Gefäßversuchen, bei denen die Spektroskopie unter Kunstlicht erfolgte, lagen im Freiland natürliche Strahlungsbedingungen vor, die in Verbindung mit einer weniger homogenen Bestandesstruktur die Ertragsmessung erschwerten und zu geringerer Güte in der Abschätzung führte.

## 4 Leguminosenanteile

Die große Bedeutung der Leguminosen für die Futterqualität und Stickstoffversorgung landwirtschaftlicher Betriebe begründet das besondere Interesse, die Anteile dieser Pflanzengruppe in den Futterbaubeständen zu optimieren. Voraussetzung hierfür ist die Kenntnis

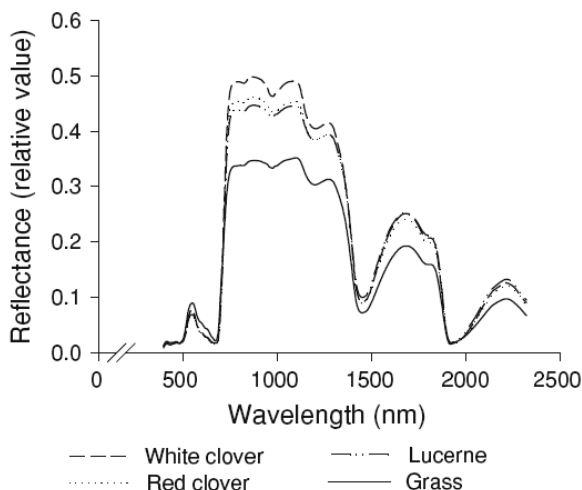


Abb. 2: Spektrale Signaturen von Reinsaaten 69 Tage alter Leguminosen/Gras-Bestände im Gefäßversuch. (Quelle: BIEWER et al. 2008, verändert).

der Ertragsanteile in den Aufwüchsen und die Frage, ob eine Einschätzung über spektroskopische Methoden möglich ist. Nach Erkenntnissen aus der Laborspektroskopie können

die Anteile von Leguminosen in getrockneten und gemahlenen Proben verlässlich bestimmt werden (WACHENDORF et al. 1997). Auch die spektralen Signaturen der hier im Vorhaben untersuchten Bestände weisen an exemplarischen Beispielen eine deutliche Unterscheidung von Leguminosen zum Gras und teilweise zwischen den Leguminosenarten auf (Abb. 2). In einem Gefäßversuch erfolgte die Prüfung der Leguminosenanteile unter Verwendung des gesamten Spektrums und es konnten signifikante Beziehungen der Leguminosenanteile ermittelt werden. Die Bestimmtheitsmaße erreichten je nach Bestandesalter Werte von  $r^2 = 0.37$  bis  $r^2 = 0.75$ . Allerdings wurden die Beziehungen von der Biomasse überlagert, so dass eine allgemeingültige Funktion für die untersuchten Bestände nicht gefunden werden konnte.

Eine deutliche Verbesserung in der Abschätzung der Ertragsanteile des Gras- bzw. Leguminosenpartners im Mischbestand konnten MEWES et al. (2008) durch die spektrale Entmischung auf Basis von Endmember-Spektren der Reinsaaten erzielen. So konnten die Grasanteile mit einem Bestimmtheitsmaß von  $r^2 = 0.81$  und Luzerne mit  $r^2 = 0.73$  geschätzt werden. Eindeutige Grenzen zeigten sich vor allem in Freilandbeständen, die in dem betreffenden Untersuchungsjahr sehr heterogene Bestandszusammensetzungen mit hohen Unkrautanteilen darstellten. Dennoch weist die Methode ein deutliches Potential auf, Informationen über die Artenzusammensetzung in Leguminosen/Gras-Beständen des Futterbaus aus hyperspektralen Daten zu generieren.

## 5 Schlussfolgerungen

Mit hyperspektralen Daten konnten Trockenmasseerträge von Leguminosen/Gras-Gemengen besser abgeschätzt werden als mit Vegetationsindizes. Eine Begrenzung des Spektralbereichs auf 620 – 1000 nm führte je nach Parameter zu einer unterschiedlichen Reduktion der Vorhersagegenauigkeit. In der Regel zeigte eine spezifische Kalibration bezogen auf Leguminosenarten eine Verbesserung der Schätzgüte. Auch für die Schätzung des Leguminosenanteils weisen hyperspektrale Datensätze ein hohes Potential auf. In diesem Zusammenhang kann die spektrale Entmischung zu einer verbesserten Schätzgüte von Ertragsanteilen beitragen. Für die Erfassung futterbaulicher Eigenschaften in Leguminosen/Gras-Gemengen unter Freilandbedingungen, scheinen hyperspektrale Daten besser geeignet zu sein als Vegetationsindizes.

## 6 Literaturverzeichnis

- BIEWER S.; FRICKE, T. & WACHENDORF, M., 2007: Abschätzung des Trockenmasseertrags von Weidelgrasbeständen und Klee grasgemengen durch den Vegetationsindex EVI und hyperspektrale Datenauswertung. In: Mittlgn. Ges. Pflanzenbauwiss., **19**, 228-229.
- BIEWER, S.; ERASMI, S.; FRICKE, T. & WACHENDORF, M., 2008: Prediction of yield and the contribution of legumes in legume-grass mixtures using field spectrometry. Precision Agriculture, Online first. DOI 10.1007/s11119-008-9078-9.
- CHO, M. A.; SKIDMORE, A.; CORSI, F.; VAN WIEREN, S. E., & SOBHAN, I., 2007: Estimation of green/herb biomass from airborne hyperspectral imagery using spectral indices and partial least squares regression. International Journal of Applied Earth Observation Geoinformation, **9** (4), 414-424.

- GELADI, P., & KOWALSKI, B. R., 1986: Partial least-squares regression: A tutorial. *Analytica Chimica Acta*, **185**, 1-17.
- HOGH-JENSEN, H.; LOGES, R.; JORGENSEN, F. V.; VINTHER, F. P. & JENSEN, E. S., 2004: An empirical model for quantification of symbiotic nitrogen fixation in grass-clover mixtures. *Agricultural Systems*, **82**, 181–194.
- LEDGARD, S. F. & STEELE, K. W., 1992: Biological nitrogen fixation in mixed legume/grass pastures. *Plant and Soil*, **141**, 137–153.
- MEWES, T.; ERASMI, S.; KAPPAS, M.; BIEWER, S.; FRICKE, T. & WACHENDORF, M., 2008: Spektrale Entmischung von Reflexionssignaturen zur Ermittlung von Leguminosenanteilen in Futterbaubeständen (Prediction of the legume proportion in legume/grass mixtures by spectral unmixing of reflection signals). *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, **4**, 265–275.
- WACHENDORF, M.; BÜCHTER, M.; TROTT, H. & TAUBE, F., 2004: Performance and environmental effects of forage production on sandy soils. II. Impact of defoliation system and nitrogen input on nitrate leaching losses. *Grass & Forage Science*, **59**, 56–68.
- WACHENDORF, M.; INGWERSEN, B. & TAUBE, F., 1997: NIRS-gestützte Schätzung des Kleeanteils von Klee grasbeständen. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.*, **10**, 219-220.
- WinISI III Manual. (2005). Version 1.60. State College, PA, USA: Infrasoftware International, LLC.

# **Spektrometrische Analysen in einem Vergleich mit den physiologischen Bedingungen von schwermetallgestresster Vegetation in einem standardisierten Experiment**

**CHRISTIAN GÖTZE<sup>1</sup>, ANDRÁS JUNG<sup>1</sup>, VERENA HENRICH<sup>1</sup> & CORNELIA GLÄBER<sup>1</sup>**

*Zusammenfassung: Auenökosysteme werden durch anthropogene Aktivitäten beeinflusst. Ein bekanntes ökologisches Problem ist die erhöhte Schwermetallbelastung. Insbesondere der Transfer der Schadstoffe vom Boden über die Pflanzen in die menschliche Nahrungskette ist sehr relevant in der mittleren Elberegion. Ziel der Forschungsarbeit ist es, mit Hilfe von spektrometrischen Feld- und Labormessungen (ASD FieldSpecPro) den aktuellen Belastungszustand des Auenökosystems zu beurteilen. Dabei werden die ökotoxikologischen Effekte der Böden indirekt aus den spektralen Eigenschaften der Auenvegetation abgeleitet und Algorithmen zur Parametrisierung bzw. Trennung von Stressmerkmalen bei der Auenvegetation getestet. Ein standardisierter Gefäßversuch mit Auenvegetation (*Alopecurus pratensis*) auf verschiedenen kontaminierten Aueböden dient als Basis der Messungen. Bei diesem Pflanzentyp wurden ebenso der relative Chlorophyllgehalt (SPAD) sowie der Blattschwermetallgehalt bestimmt und mit den Spektralanalysen verglichen. Die Ergebnisse zeigten den Normalized Pigment Chlorophyll Index (NPCI) und die Continuum-Removal-Analyse im Bereich um 1730 nm (CR1730) als hochsignifikante Methoden zu den Pflanzenparametern (SPAD) und den Schwermetallgehalten im Blatt. Ebenso konnten mit weiteren Vegetationsindizes Wasser- und Nährstoffstress ausgeschlossen werden. Damit konnte die Trennung von Schwermetallstress erfolgreich umgesetzt werden. Dieses Ergebnis muss durch weitere Analysen überprüft werden. Vor allem die Übertragung der Ergebnisse des standardisierten Gefäßversuchs auf Standorte an der Elbe könnten weiterführende Aussagen über die Wirksamkeit der Methoden geben.*

## **1 Einleitung**

Es bestehen umfassende Untersuchungen (FRIESE et al. 2000) zur stofflichen Belastung des Wassers, der Sedimente und der Böden im Einzugsgebiet der Elbe. Durch die gegenwärtig auftretenden Extrem-Hochwasser (2002, 2006) rückt das Thema der Schadstoffbelastung von Auen verstärkt in das wissenschaftliche und öffentliche Interesse. Die Schadstoffauswertungen nach dem Hochwasser von 2002 im Rahmen des Ad-hoc-Projekts „Schadstoffbelastung nach dem Elbe-Hochwasser 2002“ (BMBF-FKZ PTJ 0330492) zeigten teils stark erhöhte Bodenkontaminationen durch diverse Schwermetalle. Damit ist die uneingeschränkte Nutzung der Weiden- und Ackerflächen nicht mehr gewährleistet und auch der Transfer in die Nahrungskette kann nicht ausgeschlossen werden (FMVO 2000). Es ergibt sich ein Forschungsbedarf im Hinblick auf eine flächenhafte, zeitnahe Ausweisung der kontaminierten Auenbereiche, insbesondere nach zukünftigen Hochwassern.

1) Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften,  
AG Geofernerkundung und Kartographie, Von-Seckendorff-Platz 4, 06120 Halle (Saale),  
E-Mail: christian.goetze@geo.uni-halle.de, andras.jung@geo.uni-halle.de,  
verena.henrich@geo.uni-halle.de, cornelia.glaesser@geo.uni-halle.de



Ziel der Forschungsarbeit ist es, mit Hilfe von spektrometrischen Feld- und Labormessungen den aktuellen Belastungszustand des Auenökosystems zu beurteilen. Dabei werden die ökotoxikologischen Effekte der Böden indirekt aus den spektralen Eigenschaften der Auenvegetation abgeleitet und Algorithmen zur Parametrisierung bzw. Trennung von Stressmerkmalen bei der Auenvegetation entwickelt. Mit verschiedenen Vegetationsindizes, Methoden zur Red-Edge-Position-Bestimmung sowie der Funktionsanalyse wird die Spektralkurve der Vegetation normiert, um das Potenzial der Methoden zur Detektion von Schwermetall-Stress an den Auenpflanzen zu untersuchen. Eine Validierung der daraus resultierenden Schadensklassifikation wird durch analytische Untersuchungen erfolgen. Mit der Bestimmung des Chlorophyll- und Schwermetallgehalts können Pflanzenparameter einerseits und Indikatoren der Bodengüte andererseits ermittelt werden, die für eine nachhaltige Nutzung und den Schutz der Böden dringend notwendig sind.

## 2 Messungen und Methoden

### 2.1 Gefäßversuch

In einem standardisierten Gefäßversuch wurde die Pflanzenart *Alopecurus pratensis* untersucht. Die Auswahl der Pflanzenart wird durch Voruntersuchungen des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) sowie einer aktuellen Feldkartierung gestützt. Sie zeigt in den Untersuchungsgebieten eine Dominanz der ausgewählten Art in der Ausbreitung auf die Fläche. Im Gefäßversuch an der Versuchstation des UFZ in Bad Lauchstädt wurden 9 Gefäße (a 3 Wiederholungen und 3 Böden) bemessen. Die ausgewählten Bodenmaterialstandorte für den Gefäßversuch weisen verschiedene Belastungsgrade bei den Schwermetallgehalten auf.

### 2.2 Messungen

Innerhalb der phänologischen Phase (April-September) des Jahres 2008 wurden mit Hilfe des ASD FieldSpec Pro feld- und laborspektrometrische Messungen durchgeführt. Damit können verschiedene Entwicklungsstadien und Einflüsse im Spektralsignal dargestellt werden. In der Forschungsarbeit wird untersucht, ob sich während der phänologischen Phase Schwermetallstress detektieren und parametrisieren lässt. Insgesamt wurden 7 Zeitpunkte mit ca. 400 Spektren bemessen.

Am Beginn jeder Messung findet ein Abgleich mit einem Referenzstandard (Spectralon) statt. Alle Aufnahmen wurden als Messungen der gerichteten spektralen Reflexion einer Oberfläche im Verhältnis zu der Referenzfläche durchgeführt (Relativmessungen). Die Messungen wurden mit einem Abstand von ca. 30 cm zwischen dem Pflanzenbestand und der Optik des Gerätes durchgeführt, so dass die Aufnahmefläche der Objekte bei einem Öffnungswinkel des Sichtfeldes der Optik (field of view) von 25° annähernd gleich ist. Für die Einzelpflanzen wurden 5 Parallelmessungen durchgeführt.

Die Labormessungen dienen dem Vergleich und der Validierung der Feldmessungen. Das Spektrometerlabor des Instituts für Geowissenschaften ist eine Dunkelkammer, in der sich eine vorinstallierte Beleuchtungsquelle befindet. Diese ist eine Halogenlampe (Kaiser Studioliight 1000) mit 1000 W (3400 K). Die Pflanzenprobe wird so ausgerichtet, dass der Lichtkegel auf den Probenmittelpunkt in einem Zenitwinkel von 15° trifft.

## 2.3 Methoden

### 2.3.1 Stressparametrisierung Stufe 1

In der Forschungsarbeit wurden in der ersten Stufe der Stressparametrisierung verschiedene Formen der Normierung von Spektralkurven durch Vegetationsindizes angewandt. Es werden relevante Teilbereiche des Spektrums untersucht. Diese Vegetationsindizes beschreiben verschiedene Objekteigenschaften wie Vitalität, Biomasse, Pigmentgehalt und Blattwassergehalt. Diese Stufe der Analyse der Spektren untersucht die Ursache/Wirkung der Veränderung des Reflexionssignals. Dabei wird der Stresstyp Wasser (Trockenheit, Überangebot) sowie die Vitalität der Pflanze (Pigmentgehalt, Pigmentverteilung) untersucht. Dadurch kann dieser oben genannte Stresstyp vom Schwermetallstress getrennt werden und die Vitalitätsunterschiede kategorisiert werden.

### 2.3.2 Stressparametrisierung Stufe 2

Die zweite Stufe zur Stressparametrisierung analysiert empfindlichere Bereiche des Spektrums. Dabei werden die Pflanzeninhaltsstoffe wie Stickstoff, Lignin, Cellulose mit Hilfe von weiteren Vegetationsindizes bestimmt. Dabei können Variationen im Spektralsignal den Gehalt der Parameter aufzeigen und so Stressreaktionen darstellen.

Ebenso wird der Bereich des starken Reflexionsanstiegs von Rot zu Infrarot (690 – 740 nm), nachweislich ein Indikator für Pflanzenstress, untersucht. Insbesondere der Hauptwendepunkt (REP), der maximalen Steigung in diesem Bereich, zeigt Verschiebungen (shifts) bei exogenen Einwirkungen (HORLER et al. 1983, PINAR & CURRAN 1996). Um den Rot-Infrarot-Anstieg zu parametrisieren, stehen verschiedene Methoden zur Berechnung der REP zur Verfügung. Durch die erste Ableitung der Funktionskurve wird die maximale Steigung bestimmt.

Bei der Funktionsanalyse wird davon ausgegangen, dass die Reflexionsmessungen eines Objektes an eine kontinuierliche Funktionskurve angepasst werden können. Wichtige Merkmale einer Signaturkurve sind deren Lage, Tiefe, Ausdehnung (FWHM), Form, Steigung, lokale Minima und Maxima sowie die Hauptwendepunkte. Durch Normierungsverfahren wie die Kontinuumtransformation werden die Messwerte in ein einheitliches Skalenniveau konvertiert, damit ein Vergleich der Spektralkurven miteinander gewährleistet ist (ERASMI 2002). Die Einteilung der Kontinuumbereiche bezieht sich auf die Spektrumsabschnitte, in denen lokale Minima auftreten und bei denen Rückschlüsse auf Pflanzeninhaltsstoffe möglich sind. Durch die Normierung lassen sich Tiefe, Lage, FWHM und Steigung bestimmter Kurvenbereiche (z.B. Red-Edge) vergleichen und damit indirekt Pflanzenparameter (Chlorophyllgehalt, Blattwassergehalt) und exogene Stresseinwirkungen (Schwermetalle, Wasser) ermitteln. Die Abb. 1 zeigt die verwendeten Methoden der beiden Stufen.

Stressparametrisierung Stufe 1	Vitalitätsanalyse	Wasserstress
	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Leaf Chlorophyll Index (LCI) Photochemical Reflectance Index (PRI) Structure Insensitive Pigment Index (SIPI) Normalized Phaeophytinization Index (NPQI) Normalized Pigment Chlorophyll Index (NPCl)	Water Band Index (WBI) Normalized Difference Water Index (NDWI) Moisture Stress Index (MSI) Normalized Difference Moisture Index (NDMI) Disease Water Stress Index (DWSI)
Stressparametrisierung Stufe 2	Zellstrukturelle Veränderungen	Red-Edge-Analyse
	Normalized Difference Nitrogen Index (NDNI) Normalized Difference Lignin Index (NDLI) Cellulose Absorption Index (CAI) Plant Senescence Reflectance Index (PSRI) Continuum-Removal-Analyse bei 970 nm (CR970) Continuum-Removal-Analyse bei 1730 nm (CR1730)	Red Edge Position (REP 1. Ableitung)

Abb. 1: Übersicht der verwendeten Methoden.

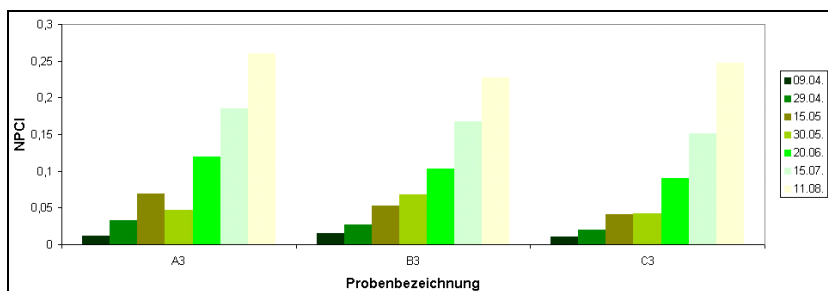


Abb. 2: Zeitliche Veränderungen der NPCl-Indexwerte für *Alopecurus pratensis*.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Spektralanalyse

Mit Hilfe der Wasserbandindizes (DSWI, MSI, WBI, NDWI, NDMI) konnte im standardisierten Gefäßversuch der Blattwassergehalt indirekt bestimmt werden. Dabei zeigten sich nur geringe Unterschiede (Standardabweichung  $\emptyset$  10 %) der Indexwerte im phänologischen Zeitraum von April bis August bei den Proben von *Alopecurus pratensis* im Bereich der empfindlichen Wellenlängen (Wasserbanden). Hierbei kann also Wasser als Stressfaktor ausgeschlossen werden. Die etwas höhere Variabilität des NDWI (22,11 %) ist durch die zellstrukturellen Veränderungen im Bereich der kleinen Wasserbande bei 1200 nm bestimmt.

Die Indizes mit denen die Vitalität bzw. Pigmentgehalt (NPCI, LCI, PRI, NDVI, NPQI, SIPI) bestimmt werden, zeigten dagegen größere Variationen im benannten Zeitraum (Standardabweichung  $\emptyset$  35 %) (Abb. 2).

Diese Abweichungen der Indexwerte zeigen damit andere Stresserscheinungen (z.B. Seneszenz, Schwermetalle, Nährstoffversorgung) bei der Pflanze auf. Die Standardabweichung der Indizes, die im sichtbaren Bereich des Lichts wirken, ist signifikant höher als die der im Bereich der Indizes (NDVI, SIPI) im Übergang vom Rot zum nahen Infrarot. In diesem Bereich setzen die Veränderungen bei Stress langsamer ein und fallen geringfügiger aus (HORLER et al. 1983).

In der zweiten Stufe der Stressparametrisierung werden die zellstrukturellen Veränderungen sowie der auf Stress empfindliche Red-Edge-Bereich untersucht. Die Ergebnisse zeigen hohe Variationen im Reflexionssignal, insbesondere beim PSRI und CAI mit einer Standardabweichung von 115,88 % und 46,16 %. Damit zeigt sich eine Veränderung der Banden für Cellulose. Beim PSRI ergibt sich die hohe Standardabweichung durch den Wechsel vom negativen zum positiven Bereich um 0. Dagegen weisen die Pflanzeninhaltsstoffe wie Stickstoff (NDNI) und Lignin (NDLI) geringe Veränderungen auf. Der empfindliche Bereich des roten Lichts und nahen Infrarots (Red-Edge-Bereich) ist nicht in diesen Vergleich mit einbezogen worden, da es sich um eine andere physikalische Einheit/Dimension handelt. Die Abweichungen vom Mittelwert 711 liegen bei 11nm, was wie in der Literatur beschrieben, eine hohe Veränderung (Shift) ist (Abb. 3).

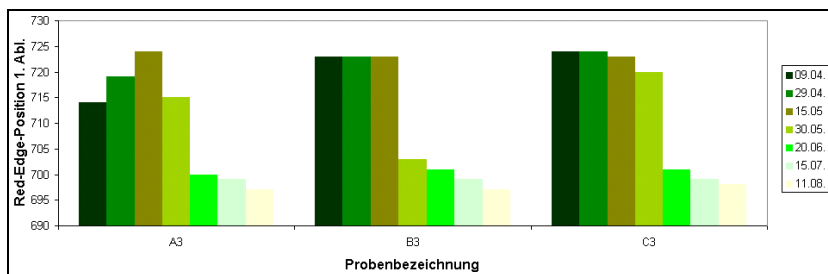


Abb. 3: Zeitliche Veränderungen der Red-Edge-Position (1. Ableitung) für *Alopecurus pratensis*.

Bei den Untersuchungen der Arbeit wurden weitere Kurvenbereiche des *Alopecurus pratensis* betrachte und der Bereich um 1730nm als mögliches Kriterium detektiert. Mit Hilfe der Continuum-Removal-Analyse wurde die Tiefe und Position der Bande bestimmt. Hierbei zeigte der Bereich der Bande um 1730nm eine hohe Änderung der Tiefe (STABW % 129,86) im Messzeitraum. Dagegen hat der CR-Bereich der kleinen Wasserbande um 970nm vernachlässigbare Unterschiede mit 25,06 % Standardabweichung und somit zeigen die Pflanzen geringe Schwankungen im Blattwassergehalt.

### 3.2 Beziehungen zwischen den Methoden und den Pflanzenparametern

Wie die erste wird auch die zweite Stufe mit den analytischen Untersuchungen verglichen. Diese Korrelationen bieten die Möglichkeit, die Methoden auf ihre Güte zu prüfen. Es konnten zwischen dem physiologischen Zustand und den Spektralmerkmalen hohe Korrelationen ermittelt werden (NPCI, LCI, CR1730, PRI, REP) (Tab. 1). Die Abb. 4 zeigt die Beziehung zwischen dem NPCI und dem relativen Chlorophyllgehalt (SPAD-Wert). Die Indexwerte des NPCI sind bei hohem Gehalt an Chlorophyll niedrig und steigen potentiell mit der Abnahme der Analysewerte. Ebenso wird die REP ab Anfang Juni zu höheren Wellenlängen verschoben (Red shift), parallel dazu nehmen die Chlorophyllwerte der Pflanzen ab ( $R^2 = 0,8004$ ). Die Wasserindizes zeigen keine signifikanten Korrelationen. Auch erste Untersuchungen mit Stichproben aus den Schwermetallanalysen zeigen eine Abhängigkeit zu den hochsignifikant getesteten Methoden NPCI und die Tiefe der CR1730. Die Abb. 5 zeigt die Korrelation zwischen dem NPCI und dem Bleigehalt in der Pflanze für den 14.05.08. Bei steigenden Indexwerten steigt linear auch der Gehalt an Blei in der Pflanze. Vergleichend mit den abnehmenden Chlorophyllgehalten ist der Stressfaktor Schwermetall für die Gefäßpflanzen Ursache für die spektralen Veränderungen.

Tab. 1: Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) für die Methoden der Spektralanalyse vergleichend zu dem relativen Chlorophyllgehalt (SPAD) über den Messzeitraum.

Index	$R^2$	Index	$R^2$	Index	$R^2$
<b>NPCI</b>	0,9148	<b>CAI</b>	0,5178	<b>SIPI</b>	0,2827
<b>REP (Abl.)</b>	0,8004	<b>NDVI</b>	0,4405	<b>NPQI</b>	0,2356
<b>PRI</b>	0,7538	<b>CR970 Tiefe</b>	0,3487	<b>WBI</b>	0,2003
<b>CR1730 Tiefe</b>	0,7375	<b>MSI</b>	0,3155	<b>DSWI</b>	0,0892
<b>LCI</b>	0,71	<b>PSRI</b>	0,2911	<b>NDLI</b>	0,0232

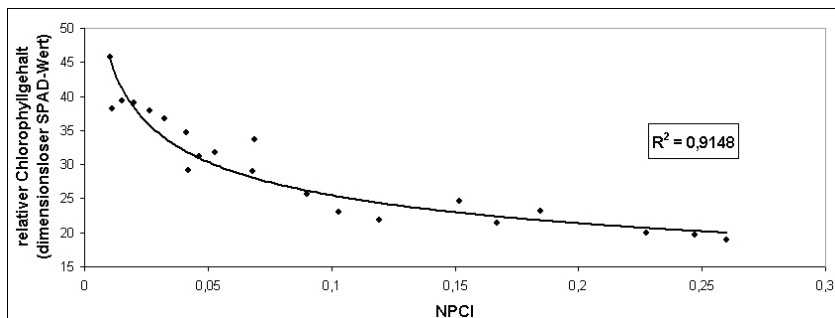


Abb. 4: Korrelation zwischen dem NPCI und dem relativen Chlorophyllgehalt (dimensionsloser SPAD-Wert) für *Alopecurus pratensis*.

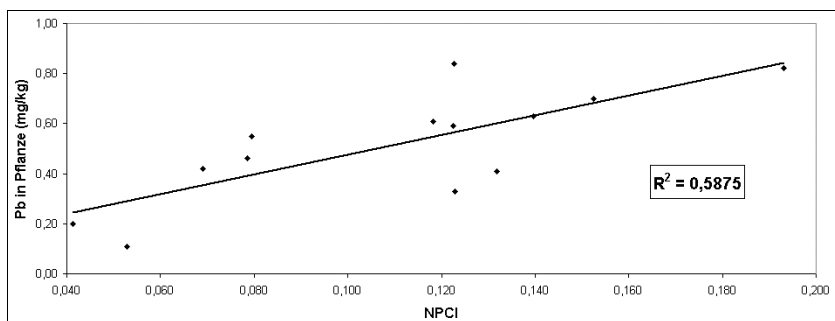


Abb. 5: Korrelation zwischen dem NPCI und dem Bleigehalt in mg/kg für *Alopecurus pratensis*.

## 4 Diskussion

Die Ergebnisse zeigen verschieden wirksame Methoden der Forschungsarbeit. Es konnte eine Trennung anderer Stressfaktoren, in der 1. Stufe Wasser und in der 2. Stufe Nährstoffgehalt, vom Untersuchungsgegenstand Schwermetall erreicht werden. Als potentielle Methoden zur Schwermetalldetektion erwiesen sich der NPCI, PRI und die REP (1. Abl.) und die Tiefe der CR1730. Sie zeigen die höchste Variabilität der Datenwerte und somit eine hohe Wirksamkeit gegenüber Stress sowie hohe Korrelationen zu den Veränderungen der Pflanzenparameter (SPAD). Auch erste vergleichende Untersuchungen der Methoden zu den Schwermetallgehalten in der Pflanze stellten sich als signifikant dar. Im Bereich um 1730nm sind die Proteine für die absorbierende Wirkung verantwortlich (KUMAR et al. 2001). Bei auftretendem Stress werden Schutzmechanismen wie die Synthese von Proteinen, Lignin, Phytochelatinen und anderen Abwehrstoffen aktiviert (TAIZ & ZEIGER 2000). Durch DEGENHARDT (2000) konnte z.B. bei

schlacke-kultiviertem Mais ein höherer Anteil an Lignin ermittelt werden (Stresslignin). Dieser Bereich um 1730nm zeigt eine Abhängigkeit der Bande zur Vitalität der Pflanze und damit die durch den Schwermetallstress verursachte erhöhte Biosynthese von Lignin und Proteinen. Dieses gewonnene Ergebnis muss durch weitere Analysen überprüft werden. Vor allem die Übertragung der Ergebnisse des standardisierten Gefäßversuchs auf Standorte an der Elbe könnten weiterführende Aussagen über die Wirksamkeit der Methoden geben. Ebenso soll die flächenhafte Ausweisung von Schadensgebieten mittels Fernerkundungsdaten (HyMap, AISA) erfolgen.

## 5 Literatur

- DEGENHARDT, B., 2000: Wachstum und physiologisches Verhalten von *Zea mays* bei multiplen Streß unter besonderer Berücksichtigung des Wurzelsystems. Dissertation, Bayerische Julius-Maximilians-Universität Würzburg.
- ERASMI, S., 2002: Analyse spektoradiometrischer in situ Messungen als Datenquelle für die teilflächenspezifische Zustandsbeschreibung von Winterweizenbeständen Dissertation. Mathematisch-naturwissenschaftliche Fakultät der Georg-August-Universität Göttingen.
- FMVO, 2000: Neufassung der Futtermittelverordnung vom 29.11.2000.
- FRIESE, K.; WITTER, B.; MIEHLICH, G. & RODE, M., 2000: Stoffhaushalt von Auenökosystemen - Böden und Hydrologie, Schadstoffe, Bewertungen, 438 S. Springer Verlag Berlin.
- HORLER, D.N.H.; DOCKRAY, M. & BARBER, J., 1983: The red edge of plant leaf reflectance. International Journal of Remote Sensing, Vol. 4, No. 2, S. 273-288.
- KUMAR, L.; SCHMIDT, K.S.; DURY, S. & SKIDMORE, A.K., 2001: Imaging spectrometry and vegetation science. In: F. van de Meer. & S.M. de Jong (Eds). Imaging Spectrometry (Kluwer Academic Press: Dordrecht), S. 111-155.
- PINAR, A. & CURRAN, P.J., 1996: Grass chlorophyll and the reflectance red edge. International Journal of Remote Sensing, Vol. 17, No. 2, 351-357.
- TAIZ, L. & ZEIGER, E., 2000: Physiologie der Pflanzen. Spektrum Akad. Verlag, Heidelberg, Berlin, S. 721-746.

# Untersuchung der Variabilität der Messsignale von vier hyper-spektralen Labor- und Feldmessgeräte

ANDRÁS JUNG<sup>1</sup>, CHRISTIAN GÖTZE<sup>1</sup> & CORNELIA GLÄßER<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: In diesem Artikel werden vier hyperspektrale Spektrometer beschrieben und verglichen wie sie bei Labor- und Geländemessungen funktionieren, welche spektralen Eigenschaften sie haben und für welche Messzwecke sie geeignet sein könnten. Es wurde bei der Messung ermittelt, dass bei einem Vergleich die White-Referenz-Messungen entscheidend sind und gewisse Korrekturen immer erforderlich sind. Das Messvermögen der Geräte wurde auf verschiedenen Materialien getestet wie Minerale und Gesteine mit diverser Herkunft und Vegetation mit diversen phänotypischen Eigenschaften.*

## 1 Einleitung

Die Fernerkundungstechnologie zeigt bezüglich ihrer Instrumentarien ein sehr vielschichtiges Bild. Während multispektrale Geodaten herkömmlich mittels Satelliten erfasst werden, basieren hochauflösende Hyperspektraldaten am meisten auf Flugzeugebene bzw. Feld- und Labormessungen. In dieser Arbeit wurden vier verschiedene Spektrometer von zwei Firmen untersucht, um ihre Vergleichbarkeit sowohl im Gelände als auch im Labor zu testen. Die meisten hyperspektralen terrestrischen Messgeräte sind Spektroradiometer, angewendet unter Labor- und Feldmessbedingungen, die im sichtbaren Licht und unterschiedlichen Infrarotbereichen elektromagnetische Signale in sehr kurzen Wellenlängenabständen abtasten können. Mit den Ergebnissen der jetzigen Arbeit kann die spektrometrische Gelände- und Laborarbeit unterstützt werden, insbesondere bei Forschungszielen in der Geologie, Landwirtschaft und umweltrelevanten Forschungs- und Anwendungsbereichen.

## 2 Problemstellung

Die meisten verfügbaren Hyperspektralbibliotheken oder Forschungsprojekte wurden mit unterschiedlichen Spektrometern erarbeitet. Die Vergleichbarkeit und Kompatibilität sollte aber gewährleistet werden, unabhängig davon ob unterschiedliche Spektrometer eingesetzt werden. Somit ist eine Realisierung zur Datenbankenverschneidung und -austausch wesentlich einfacher umsetzbar (CASTRO-ESAU et al. 2006). Vor den Messungen wurden mehrere Fragen diskutiert, von denen vier durch diese Arbeit beantwortet werden können.

1. Können Ergebnisse verschiedener Spektrometer und verschiedener Messungen miteinander verglichen werden?
2. Sind die White-Reference-Messungen entscheidend für die Ergebnisse?

<sup>1</sup>) Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften, Arbeitsgruppe Geofernerkundung und Kartographie, Von-Seckendorff-Platz 4, 06120 Halle; Email: [andras.jung@geo.uni-halle.de](mailto:andras.jung@geo.uni-halle.de), [christian.goetze@geo.uni-halle.de](mailto:christian.goetze@geo.uni-halle.de), [cornelia.glaesser@geo.uni-halle.de](mailto:cornelia.glaesser@geo.uni-halle.de)



3. Sollten die Spektralkurven von verschiedenen Messgeräten korrigiert werden?
4. Wie kann eine Korrektur durchgeführt werden.

### 3 Technische Beschreibung der Messgeräte

In diesem Abschnitt werden die getesteten Messgeräte kurz beschrieben. Die Auswahl der Geräte spiegelt nicht das volle Angebotsspektrum der einzelnen Firmen wieder, sondern nur die zur Verfügung gestellten Modelle. Die Tab.1 zeigt die wichtigsten technischen Eigenschaften der Spektroradiometer der Firma ASD (ASD). In der Tab. 2 werden die gleichen Eigenschaften der Spektrometer der deutschen Firma Tec5 (TEC5) zusammengefasst.

Tab.1: Technische Eigenschaften der hyperspektralen Messgeräte der Firma ASD.

<b>Spektroradiometer der Firma ASD/<a href="http://www.asdi.com">www.asdi.com</a></b>		
<b>Produkt</b>	<b>FieldSpecPro FR<sup>®</sup></b>	<b>TerraSpec<sup>®</sup></b>
Spektralbereich	350-2500 nm	350-2500 nm
Spektrale Auflösung	3 nm (350-1000 nm) 10 nm (1000-2500 nm)	3 nm bei 700 nm 6 nm bei 1700 nm 7 nm bei 2150 nm
Spektrale Empfindlichkeit	1,4 nm (350-1050 nm) 2 nm (1000-2500 nm)	1,4 nm (350-1050 nm) 2 nm (1000-2500 nm)
Zeitliche Auflösung	0,1 s	0,1 s
Detektoren	1 Si-Photodiode (350 - 1000 nm) 2 InGaAs-Photodioden (1000 - 2500 nm)	1 Si-Photodiode (350 - 1000 nm) 2 InGaAs-Photodioden (1000 - 2500 nm)
Gewicht/Abmaße	7,2 kg /35 x 29 x 13 cm	5,7 kg / 13 x 37 x 29 cm

Die zwei Spektrometer von ASD bilden ihre White Reference (WR) mit Hilfe einer Spectralon-Platte (SPECTRALON 2009). Die Spektrometer von Tec5 haben einen geräteeigenen Weißabgleich mit den gleichen chemischen Eigenschaften. Die Weißabgleichplatten zeigten bei den Messungen Unterschiede auf, welche nachträgliche Korrekturen benötigten. Im folgenden Text werden anstatt FieldSpec<sup>®</sup>Pro FR, HandySpec<sup>®</sup> Field<sup>VIS</sup>, HandySpec<sup>®</sup> Field<sup>VIS/NIR</sup>, TerraSpec<sup>®</sup> als Vereinfachung FieldSpec, HandySpec<sup>VIS</sup>, HandySpec<sup>VIS/NIR</sup> und TerraSpec geschrieben. Zusätzlich unterscheiden sich die Geräte auch in ihrer Beleuchtungsquelle. Während das FieldSpec die einfallende Sonnenstrahlung nutzt, wird beim HandySpec<sup>VIS</sup> zusätzlich (bei Feldmessungen) die einfallende Strahlung der oberen Hemisphäre dynamisch durch Filterung ausgeglichen. Die zwei mit internen Lichtquellen versorgten Laborspektrometer unterscheiden sich durch ihre Lichtquellenanzahl, wobei HandySpec<sup>VIS/NIR</sup> mit zwei Lichtquellen und TerraSpec mit einer ausgestattet ist.

Tab.2: Technische Eigenschaften der hyperspektralen Messgeräte der Firma Tec5.

<b>Spektroradiometer der Firma Tec5/www.tec5.com</b>		
<b>Produkt</b>	<b>HandySpec<sup>®</sup>Field<sup>VIS</sup></b>	<b>HandySpec<sup>®</sup>Field<sup>VIS/NIR</sup></b>
Spektralbereich	400-1100 nm	400-1690 nm
Spektrale Auflösung	3,3nm (400-1,000 nm)	3,3nm (400-1.000 nm) 1,5nm (1,000-1,690nm)
Spektrale Empfindlichkeit	10nm(400-1,000nm)	10nm (400-1.000nm) 5nm (1,000-1,690nm)
Zeitliche Auflösung	1,5 ms – 6s (400-1,000 nm)	1,5ms – 6s (400-1,000 nm) 0,1ms – 1,5s (1,000-1,690nm)
Detektoren	1 Si-Diode (400-1,000nm) mit 256 Pixel	1 Si-Diode (400-1,000nm) mit 256 Pixel 1 InGaAs-Diode (1,000nm – 1,690nm) mit 512 Pixel
Gewicht/Abmaße	4 kg, 16 x 36 x 10 cm	13 kg , 23 x 33 x 11 cm

## 4 Beschreibung der Messungen

### 4.1 Probenauswahl

Im sichtbaren Licht und nahen Infrarotbereich kann die Vegetation am besten spektrometriert werden. Bei den geologischen Untersuchungen sind zusätzlich die längeren Wellenlängenbereichen von großer Bedeutung, auf die in der Praxis nicht verzichtet werden kann (DE JONG, & VAN DER MEER 2004). Die geologischen Proben stammen aus der Sammlung der Martin-Luther Universität (MLU).

Das Institut für Geowissenschaften AG Geofererkundung an der MLU verfügt über ein Spektrometerlabor. Die Proben wurden hier für die Messungen vorbereitet und unter künstlicher Beleuchtung spektrometriert. Die mikroklimatologischen Bedingungen im Labor wurden durch eine automatische Klimaanlage (kontinuierliche Temperaturen mit sehr geringen Feuchtigkeitsschwankungen) optimiert. Die anorganischen Proben wurden 48 Stunden vor den Messungen im Labor aufbewahrt, um eine einheitliche Temperatur zu gewährleisten. Die pflanzlichen Gefäßproben wurden 24 Stunden vor der Messung nicht mehr beregnet, um eine wasserfreie Blattoberfläche messen zu können.

Ein Teil der Pflanzen (Tab. 3.: Num. 13, 14, 15, 16) wurde aus dem Feld eingeholt, der andere Teil in einem Gefäßversuch (Tab. 3.: 17, 18) vorgezchtet. Die Proben wurden teilweise auch im Hof des Universitätsgeländes gemessen. Die spektrometrischen Feldmessungen sind sehr Wetterempfindlich, was auch berücksichtigt werden musste. Zusätzliche atmosphärische Korrektur für die terrestrischen Messungen wurde nicht durchgeführt.

Die spektralen Messungen fanden an zwei Messtagen (05.07.07 und 13.11.07) statt. Am 05.07.07 wurde mit HandySpec<sup>VIS</sup>, FieldSpec und Terraspec bzw. am 13.11.07 mit HandySpec<sup>VIS/NIR</sup>, FieldSpec und TerraSpec gemessen.

Tab.3: Messobjekte mit Messzeit und Messgerät.

Nr.	Name	Messtag 05.07.07*	Messtag 13.11.07*
Mineralen (M)/ Gesteine (G)			
1	(M) Apatit (apa)	FieldSpec (Fs) TerraSpec (Ts) HandySpec <sup>vis</sup> (Hs)	FieldSpec (Fs) TerraSpec (Ts) HandySpec <sup>vis/NIR</sup> (Ms)
2	(M) Augit (aug)		
3	(M) Chlorit (chl)		
4	(G) Phonolit (pho)		
5	(G) Siderit (sid)		
6	(G) Trachit (tra)		
7	(G) Travertin (tra)	Am 05.07.07 nicht einbezogen.	
8	(G) Galenit(gal)		
9	(M) Malachit (mal)		
10	(M) Sphalerit (sph)		
11	(M) Stibnit (sti)		
12	(M) Smithsonian (smi)		
Pflanzen aus Gelände			
13	Urtica dioica_9 (Ud9)	FieldSpec (Fs), HandySpec <sup>vis</sup> (Hs)	Geländemessung war nicht mehr möglich
14	Urtica dioica_22 (Ud22)		
15	Corynophorus canescens (Cc)		
16	Sueda maritima (Sm)		
Pflanzen aus dem Gefäßhaus			
17	Hieracium pilosella (Hp)	FieldSpec (Fs) HandySpec <sup>vis</sup> (Hs)	FieldSpec (Fs),TerraSpec (Ts), HandySpec <sup>vis/NIR</sup> (Ms)
18	Trifolium arvense (Ta)	Am 05.07.07 noch nicht einbezogen.	FieldSpec (Fs) HandySpec <sup>vis/NIR</sup> (Ms)

\*: In Klammern nach dem Namen des Spektrometers steht die Abkürzung.

Bei der Vegetation wurde darauf geachtet, dass Pflanzen mit unterschiedlichen Aufbaustrukturen, morphologischen Eigenschaften (haarige Blätter bei *Hieracium pilosella*, *Urtica dioica*) bzw. phänotypischen (monokotyle: *Corinophorus canescens*, dikotyle: *Trifolium arvense*) verwendet wurden (SHAOKUI et al. 2006, LI et al. 2006). Bei kleinwüchsigen Pflanzen wie *Hieracium pilosella* (Hp), *Trifolium arvense* (Ta), *Sueda maritima* (Sm) wurde die ganze Pflanze vertikal spektrometriert, während bei *Urtica dioica* (Du) und *Corynophorus canescens* (Cc) wegen des hohen Bestandes, nur Einzelblätter gemessen wurden.

Zur Erläuterung der Tab. 3 ist zu bemerken, dass die Anzahl der geologischen Messobjekte für den zweiten Messtag (13.11.07) erhöht wurde bzw. die Pflanzenproben vom Gelände aus phänologischen Gründen nicht mehr aufzufinden waren. Deswegen konnten am zweiten Messtag nur vorgezuchtete Gefäßpflanzen berücksichtigt werden.

## 5 Spektrale Vergleichsmethoden

Unser Konzept war es, dass eine einzige Vergleichsmethode für die spektrale Ähnlichkeit nicht ausreichend ist, drei oder mehr Vergleichsmethoden könnten aber sicherere Ergebnisse liefern. In der Arbeit sind drei Verfahren berücksichtigt worden, bevor die Ähnlichkeitsmaße definiert wurde. Im Folgenden werden diese Methoden beschrieben: Binary Encoding (BE), Spectral Angle Mapper (SAM) und Spectral Feature Fitting (SFF).

Die Binärcodierung ist ein einfaches und schnelles Verfahren und verfügt über verschiedene Modifikationen. Das Binärcodierungsverfahren ermöglicht die Transformation in zwei Werte 0 und 1 (Zweiwert Funktion) (GOETZ et al. 1985, MASER et al. 1988, KRUSE et al 1993a). Wenn der Reflexionswert  $x(I)$  der gegebenen Bänder für ein Pixel oder Messpunkt größer oder kleiner des Grenzwertes  $G$  ist, dann wird der Funktionswert  $h(I)$  0 oder 1.  $G$  kann ein von Benutzern definierter Wert sein, der oft auch als Durchschnittswert genommen wird.

Die unterschiedliche Beleuchtungssituation der Referenzspektren wird bei der SAM Methode ignoriert, da dieser lediglich die Vektorrichtung, nicht aber die Vektorlänge berücksichtigt. Diese Eigenschaft und die einfache Funktionsweise machen SAM zu einem verbreiteten Werkzeug der Spektrumsanalyse. Die SAM-Methode basiert auf der Ableitung der spektralen Ähnlichkeit im  $n$ -dimensionalen Merkmalsraum, der aus  $N$  Spektralkanälen gerechnet wird (KRUSE et al. 1990, 1993b).

Die SFF-Methode vergleicht die Absorptionsbanden von zwei Spektren für jeden selektierten Spektralkanal mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadratsumme miteinander. Das Verfahren führt die Normierung der beiden Spektren auf das jeweilige Kontinuum. Ein RMS-Fehler wird für jedes Spektrum berechnet und bestimmt die Genauigkeit der Analyse (SWAYZE et al. 1992, CROWLEY et al. 1995). Die oben erwähnten Methoden sind in das Softwarepaket ENVI 4.4 integriert (ENVI 2009).

## 6 Ergebnisse und Diskussion

### 6.1 Korrektur des Weißabgleichs

Der Vergleich von verschiedenen Messgeräten kann deutlich genauer sein, wenn der Weißabgleich bekannt ist. Die Abb. 1 zeigt wie sich die Korrektur auf den Vergleich auswirkt und wie sich die Vergleichsergebnisse verändern können. 'HandySpec\_original' weicht von 'TerraSpec\_original' stark ab, obwohl die gleichen Oberflächen gemessen wurden. Alle gemessenen Werten wurden nach den TerraSpec-Werten korrigiert.

Alle Originalmesswerte von HandySpec<sup>VIS/NIR</sup> wurden mittels Gleichung (1) umgerechnet, um die Messergebnisse vergleichen zu können. Der Weißabgleich (WA) wurde überprüft und deutliche Unterschiede konnten nur bei (HandySpec<sup>VIS/NIR</sup>) identifiziert werden. Es ist zu erwähnen, dass die Benutzung des gleichen WA bei Feldmessungen nur im theoretischen oder messtechnischen Sinn von Bedeutung ist, weil die räumliche und zeitliche Unterschiede der Messungen in der Praxis das gar nicht ermöglichen. Wenn die Weißabgleichswerte mitgespeichert werden, können die Ergebnisse nach der Korrektur noch immer besser verglichen werden.

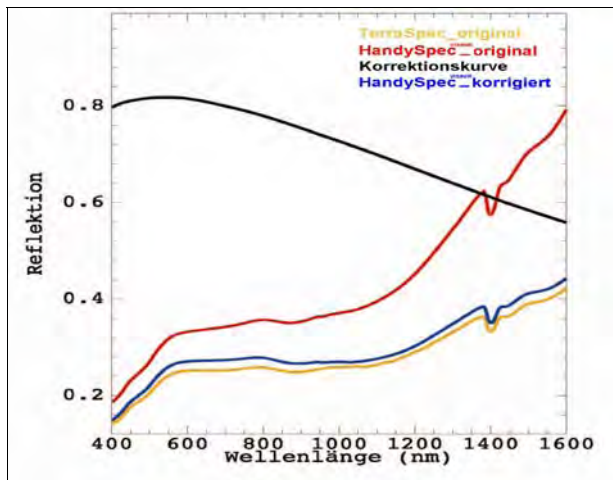


Abb. 1: Kurvenverlauf vor- und nach der Korrektur

$$RK_{HandySpec}^{VIS/NIR} \cdot \frac{WrK_{HandySpec}^{VIS/NIR}}{WrK_{TerraSpec}} = KorrrK_{HandySpec}^{VIS/NIR} \quad (1)$$

$RK_{HandySpec}^{VIS/NIR}$  = Reflektionskurve von HandySpec<sup>VIS/NIR</sup>

$WrK_{HandySpec}^{VIS/NIR}$  = White-Reference-Reflektionskurve von HandySpec<sup>VIS/NIR</sup>

$WrK_{TerraSpec}$  = White-Reference-Reflektionskurve von TerraSpec

$KorrrK_{HandySpec}^{VIS/NIR}$  = Korrigierte Reflektionskurve von FieldSpec<sup>VIS/NIR</sup>

## 6.2 Statistische Interpretationen der Messergebnisse

Bei der Bewertung wurden die Übereinstimmungswerte in so genannte „Scorewerte“ angegeben. Die Benennung stammt aus der ENVI Nomenklatur (ENVI 2009) und wurde auch für die Arbeit übernommen. Für BE, SAM und SFF wird ein Wert zwischen 0-1 nach dem Vergleichsprozess festgelegt und dann die drei „Scorewerte“ aufsummiert. So sind die „Scorewerte“ im schlechtesten Fall gleich 0 und im besten Fall gleich 3 (siehe Tab.4, 5). Alle Messobjekte wurden in einer Matrix miteinander verglichen. Dadurch konnte eine einfache Auswahl von Spektren getroffen werden, die eine hohe Ähnlichkeit aufweisen. Die besten Scorewerte wurden mit grünen Farben und die zweitbesten mit blauen Farben versehen. Als Kontrollwerte wurden in der Matrix auch die gleichen Kurven verglichen, bei denen sich die höchsten Scorewerte ergaben. Die Zellen die 'FALSCH' beinhalten zeigen, dass ein Messobjekt mit einem anderen (fremden) Messobjekt spektral besser übereinstimmt. Die in der Tab. 4 aufgeführten exemplarischen

Ergebnisse zeigen wie stark sich die Werte nach der Korrektur verändert haben. Es konnten alle Falschklassifikationen durch die Korrektur eliminiert werden und damit stimmen alle untersuchten Materialien miteinander überein.

Tab. 4: Scorewerte für Mineralen und Gesteine, vor der Korrektur (MIN\_Orig) und nach der Korrektur (MIN\_Korr), Fs für FieldSpec, Ms für HandySpec<sup>VIS/NIR</sup>, Hs für HandySpec und Ts für TerraSpec.

MIN_Orig	Ms_apa	Ts_apa		Ms_aug	Ts_aug
Fs_apa	FALSCH	2,9	Fs_aug	FALSCH	2,8
Ts_apa	FALSCH	(3)	Ts_aug	FALSCH	(3)
	Ms_chl	Ts_chl		Ms_pho	Ts_pho
Fs_chl	1,8	2,9	Fs_pho	FALSCH	2,9
Ts_chl	1,8	(3)	Ts_pho	FALSCH	(3)
	Ms_sid	Ts_sid		Ms_tra	Ts_tra
Fs_sid	1,8	2,8	Fs_tra	FALSCH	2,8
Ts_sid	1,7	(3)	Ts_tra	FALSCH	(3)

MIN_Korr	Ms_apa	Ts_apa		Ms_aug	Ts_aug
Fs_apa	2,9	2,9	Fs_aug	2,6	2,8
Ts_apa	2,8	(3)	Ts_aug	2,4	(3)
	Ms_chl	Ts_chl		Ms_pho	Ts_pho
Fs_chl	2,9	2,9	Fs_pho	2,8	2,9
Ts_chl	2,8	(3)	Ts_pho	2,7	(3)
	Ms_sid	Ts_sid		Ms_tra	Ts_tra
Fs_sid	2,8	2,8	Fs_tra	2,8	2,8
Ts_sid	2,9	(3)	Ts_tra	2,9	(3)

Zur Erläuterung der Tab. 5 muss erwähnt werden, dass die Messungen bzw. Messmöglichkeiten bei Pflanzen von vielen Einflussfaktoren abhängig sein können. Pflanzen verändern ihr Reflexionssignal je nach phänologischer Phase, physiologischem Zustand und ebenso zwischen Blatt- oder Bestandsebene (SHAOKUI et al. 2006, LI et al. 2006).

Tab.5: Vergleichsergebnisse für Vegetationsuntersuchungen (n.g.:nicht gemessen)

VEG	Ms_Hp	Ms_Ta
Fs_Hp	2,6	n.g.
Fs_Ta	n.g.	2,2
VEG_KORR	Ms_Hp	Ms_Ta
Fs_Hp	2,7	n.g.
Fs_Ta	n.g.	2,3

Durch die unterschiedliche Ausstattung der Geräte sind beim Vergleich der Pflanzenproben einige für die Spektrenmessung wichtige Punkte zu beachten. Der Abstand vom Objekt sowie die Lichtquelle beeinflussen das Messsignal. Bei den Kontaktmessungen (Terraspec) konnten deshalb nur einzelne Blätter gemessen werden.

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass der erfolgreiche Vergleich von verschiedenen Messgeräten nur dann möglich ist, wenn der Weißabgleich bekannt ist und somit eine Korrektur der Spektren durchgeführt werden kann. Deshalb kann bei der Nutzung von Spektralbibliotheken ohne Angabe der White Referenz die Qualität der Vergleichbarkeit nicht gewährleistet werden.

In der Forschungsarbeit haben sich keine Allzweckspektrometer herauskristallisiert, weil die Messbedingungen in vielen Fällen so speziell sind. Speziell für die jeweiligen Forschungsziele müssen die Bedingungen der zu untersuchenden Objekte bekannt sein, um das entsprechende Spektrometer auswählen zu können.

## Danksagung

Wir bedanken uns bei der Firma Tec5 für die Bereitstellung ihrer Spektrometer HandySpecVIS und HandySpecVIS/NIR. Ohne die Zusammenarbeit (Mineralien und Bereitstellung des Spektrometers TerraSpec) mit der Arbeitsgruppe Petrologie und Lagerstättenkunde speziell Prof. G. Borg (MLU Halle), A. Kamradt und M. Sadeghi wäre dieser Vergleich nicht möglich gewesen.

## 7 Literaturverzeichnis

- ASD INC., 2009: <http://www.asdi.com/products-spectroradiometers.asp>. 14.01.2009
- CASTRO-ESAU, K.L.; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, G.A. & RIVARD, B., 2006: Comparison of spectral indices obtained using multiple spectroradiometers Remote Sensing of Environment, **103**, (3) S. 276-288
- CROWLEY, J.K. & CLARK, R.N., 1992: AVIRIS study of Death Valley evaporite deposits using least-squares band-fitting methods. Summaries of the 3rd Annual JPL Airborne Geoscience Work-shop, JPL Publication, **92-14** (1), S. 29–31.
- DE JONG, S. M. & VAN DER MEER, F. D., (Eds.) 2004: Remote Sensing Image Analysis: Including the Spatial Domain. 359 p.
- ENVI, 2009. <http://www.itvis.com/ProductServices/ENVI.aspx> 14.01.2009
- GOETZ, A.F.H.; VANE G.; SOLOMON, J.E. & ROCK, B.N., 1985: Imaging spectrometry for earth remote sensing. Science, **218**, S. 1147-1153.
- KRUSE, F.A.; KEIREIN-YOUNG, K.S. & BOARDMAN, J.W., 1990: Mineral Mapping at Cuprite, Nevada with a 63-channel Imaging Spectrometer. Photogramm. Eng. and Remote Sensing, **56**, S. 83-92.
- KRUSE, F.A.; LEFKOFF, A.B. & DIETZ J.B., 1993b: Expert System-based mineral mapping in northern Death Valley, California/Nevada using the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). Remote Sensing of the Environment, **44**, S.309–336.
- KRUSE, F.A.; LEFKOFF, A.B.; BOARDMAN, J.B.; HEIDEBRECHT, K.B.; SHAPIRO, A.T.; BARLOON, P.J. & GOETZ, A.F.H., 1993a: The spectral image processing system (SIPS)–Interactive

- visualization and analysis of imaging spectrometer data. Remote Sensing of Environment, **44**, S.145-163.
- LI S.; XI, C.; JIANJUN, W.; XIANWEI, F.; ANMING, B.; YAQIN, M. & DENGWEI, W., 2006: Study on the bio-mass change derived from the hyperspectral data of cotton leaves in canopy under moisture stress Chinese Science Bulletin, **51**(0), S.173-178.
- MAZER, A.S.; MARTIN, M.; LEE, M. & SOLOMON, J.E., 1988: Image Processing Software for Imaging Spectrometry Analysis. Remote Sensing of Environment, **24** (1), S. 201- 210.
- SHAOKUI, G.E.; JAMES, E.; RAYMOND, C.; PENG, G. & GERALD, A., 2006: Hyperspectral Characteristics of Canopy Components and Structure for Phenological Assessment of an Invasive Weed. Environmental Monitoring and Assessment, **120**(1), S.109-126.
- SPECTRALON, 2009. <http://www.labsphere.com/productdetail.aspx?id=226> 14.01.2009
- SWAYZE, G.A. & CLARK, R.N., 1995: Spectral identification of minerals using imaging spectrometry data: evaluating the effects of signal to noise and spectral resolution using the tricorder algorithm. Summaries of the 5th Annual JPL Airborne Earth Science Workshop. JPL Publication, **95-1**, S.157–158.
- TEC5 AG., 2009: <http://tec5.de/deutsch/home.html#> 14.01.2009





# Auswirkungen der Bildfusion auf Hyperspektraldaten

SASCHA KLONUS<sup>1</sup> & MANFRED EHLERS<sup>2</sup>

*Zusammenfassung: In dieser Studie werden Hyperspektraldaten mit Luftbilddaten des Local Earth Observation System (LEO) fusioniert. Als Verfahren wird die Ehlers Fusion verwendet, da diese die Grauwerte im Vergleich zu anderen Verfahren am wenigsten verändert. Die Qualität der fusionierten Bilder wird anhand von visuellen und statistischen Analysen überprüft. Bei der visuellen Auswertung werden die einzelnen fusionierten Kanäle mit dem Original verglichen. Dieses reicht bei einer hyperspektralen Szene aber nicht aus, daher erfolgt anschließend eine statistische Analyse. Bei dieser Bewertung kommen quantitative Verfahren zum Einsatz, welche die Erhaltung der spektralen Charakteristiken und die räumliche Verbesserung beurteilen. Das Ergebnis zeigt, dass bei Hyperspektraldaten die Ehlers Fusion Veränderungen an den Spektren verursachen kann.*

## 1 Einleitung

Die Bildfusion, auch Pansharpening genannt, wird verwendet, um hoch aufgelöste panchromatische Daten mit räumlich niedriger aufgelösten multi- oder hyperspektralen Daten zu kombinieren. Dadurch wird ein räumlich hoch aufgelöstes multispektrales bzw. hyperspektrales Bild erzeugt. Bildfusionstechniken in der Fernerkundung werden generell in drei Klassen eingeteilt: pixelbasiert (ikonisch), merkmalsbasiert (symbolisch) und wissensbasiert (POHL & VAN GENDEREN 1998). Von größter Bedeutung für die Fernerkundung ist die ikonische Bildfusion, für die viele unterschiedliche Verfahren entwickelt wurden (ALPARONE et al., 2006; KLONUS & EHLERS 2007).

Werden Hyperspektraldaten mit räumlich hochauflösenden Bilddaten über typische pixelbasierte Fusionsarten wie der IHS (Intensity-Hue-Saturation) oder PC (Principal Component) Transformation kombiniert, so werden oft spektrale Veränderungen in den Ergebnissen erzeugt. Der Grund für diese Farbveränderungen ist, dass die räumlich hochauflösenden panchromatischen Bilddaten nicht mit der spektralen Abdeckung der multi- bzw. hyperspektralen Kanäle übereinstimmen. Als Fusionsverfahren wurde daher die Ehlers Fusion (KLONUS & EHLERS 2007) verwendet, da sie im Vergleich mit anderen Verfahren die höchste Farberhaltung bei gleichzeitiger guter räumlicher Verbesserung zeigt (EHLERS & KLONUS 2008).

In dieser Studie werden Daten des Hyperspektralsensors HyMap mit einer räumlichen Auflösung von 3 m mit bildtechnisch erzeugten panchromatischen Daten des Local Earth Observation System (LEO) kombiniert, die in einer Pixelgröße von 0,5 m vorlagen.

1) Sascha Klonus, Institut für Geoinformatik und Fernerkundung der Universität Osnabrück, Seminarstr. 19a/b, 49069 Osnabrück; E-mail: sklonus@igf.uni-osnabrueck.de

2) Manfred Ehlers, Institut für Geoinformatik und Fernerkundung der Universität Osnabrück, Seminarstr. 19a/b, 49069 Osnabrück; E-mail: mehlrs@igf.uni-osnabrueck.de

## 2 Untersuchungsgebiet und Daten

Das Untersuchungsgebiet für diese Studie ist die Stadt Osnabrück; als Grundlage dienen Daten, die in den Jahren 2003 und 2004 aufgenommen wurden. Es wurde in dieser Studie ein Ausschnitt gewählt, der in der Innenstadt liegt und sowohl unterschiedliche Vegetationsarten wie auch Dacharten enthält.

Als panchromatische Grundlage wurden Daten des Local Earth Observation System (LEO) genutzt. LEO wird in einem Leichtflugzeug eingesetzt und verfügt über eine kreiselstabilisierten Plattform, die sowohl Digitalkameras als auch analoge Mittelformatkameras aufnehmen kann. Das System wurde von der Fachhochschule Bochum mit externen Kooperationspartnern entwickelt. Für die direkte Georeferenzierung der Kameraaufnahmen und die Regelung der kreiselstabilisierten Plattform wurde ein funktionales Modell entwickelt (BÄUMKER et al., 2003).

Über dem Untersuchungsgebiet Osnabrück wurden zwei Kampagnen mit der stabilisierten Sensorplattform des LEO durchgeführt. Der erste Bildflug mit einer analogen Rollei 6006 fand am 16. Mai 2003 statt. Der zweite Bildflug wurde am 30. Juli 2004 mit der digitalen Kodak DC14n aufgenommen. Die Rollei 6006 ist eine Mittelformatkamera, die als Teilmesskammer über Passmarken verfügt. Für die Aufnahmen wurde ein Zeiss Distagon Objektiv verwendet. Die Kodak DC14n dagegen ist eine digitale Spiegelreflexkamera (Digital Single Lens Reflex, - DSLR) und verfügt über einen Vollformat-CMOS-Chip (Complementary Metal Oxide Semiconductor).

Die Kameradaten und Flugbedingungen der beiden Kampagnen sind der folgenden Tabelle zu entnehmen (nach Greiwe 2006):

	<b>Leo2003</b>	<b>Leo2004-15</b>	<b>Leo2004-25</b>
<b>Kamera</b>	Rollei 6006	Kodak DC14n	
<b>Sensorfläche</b>	55 mm x 55 mm Farbdiapositiv (analog)	36 mm x 24 mm Vollformat CMOS	
<b>Pixelgröße</b>	8,5 µm (@3000 dpi)	8 µm	
<b>Objektiv</b>	Zeiss Distagon f/4,0 50	Nikon Nikkor AF 50 f/1,8 D	
<b>Objektivbrennweite</b>	51,10 mm	51,25 mm	
<b>mittl. Flughöhe über Grund</b>	750 m	950 m	1600 m
<b>Auflösung</b>	0,12 m	0,15 m	0,25 m

Tab. 1: Kameradaten der LEO-Kampagnen in 2003 und 2004

Zur Erstellung des panchromatischen Kanals wurden die Mittelwerte der drei Farbkanaäle (rot, grün, blau) berechnet. Das Ergebnis für den Ausschnitt zeigt Abb. 1.



Abb. 1: Panchromatisches Eingabebild berechnet aus den RGB Kanälen des LEO

HyMap ist ein flugzeuggetragener hyperspektraler Sensor, dessen Lage wird durch eine dreiaxige kreiselstabilisierte Plattform stabilisiert wird (COCKS et al., 1998). Das IFOV (Instantaneous Field of View) des Scanners beträgt 2.5 mrad längs und 2.0 mrad quer zur Flugrichtung. Für den vorliegenden Bildflug wurde die Flughöhe von 1500 m über Grund gewählt, um eine GSD (Ground Sampling Distance) von 3 m quer und 4 m längs zur Flugrichtung zu erreichen. Aus dem Öffnungswinkel der Sensoroptik resultiert somit eine Streifenbreite von 1570 m, die durch 512 Pixel abgebildet werden. Das reflektierte Spektrum zwischen 450 nm und 2500 nm wird durch HyMap in 128 Kanälen mit einer Kanalbreite von 15 bis 20 nm aufgezeichnet (Tab. 2).

Spektrometer	Spektralbereich	Bandbreite
Sichtbarer Bereich	450-890 nm	15-16 nm
NIR (nahes Infrarot)	890-1350 nm	15-16 nm
SWIR I (Kurzwellen Infrarot)	1400-1800 nm	15-16 nm
SWIR II (Kurzwellen Infrarot)	1950-2480 nm	18-20 nm

Tab. 2 Konfiguration der Spektrometer des HyMap (aus: Cocks et al., 1998)

Vor einer Berechnung der Reflektanzen aus den gemessenen Strahldichten wurden die vom Sensorbetreiber maskierten überstrahlten Pixel (bad pixel) durch eine einfache Mittelung der nächsten Nachbarn einer Sensorzeile ersetzt, sofern diese nicht ebenfalls als „bad pixel“ maskiert waren.

Durch das Softwarepaket FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hyperspectral Cubes) wurden die gemessenen Strahldichten anschließend in absolute Reflexionswerte überführt. FLAASH basiert auf der Software MODTRAN. Aufgrund fehlender gemessener Atmosphärenparameter für die Berechnungen im Rahmen dieser Arbeit wurden die Standardparameter des MODTRAN Modells „mid latitude summer“ angenommen. Als „bad band“ wurden vom

Betreiber des Sensors das erste und letzte Band des VIS-Spektrometers markiert. Somit wurden für diese Untersuchung nur die übrigen 126 Kanäle verwendet.

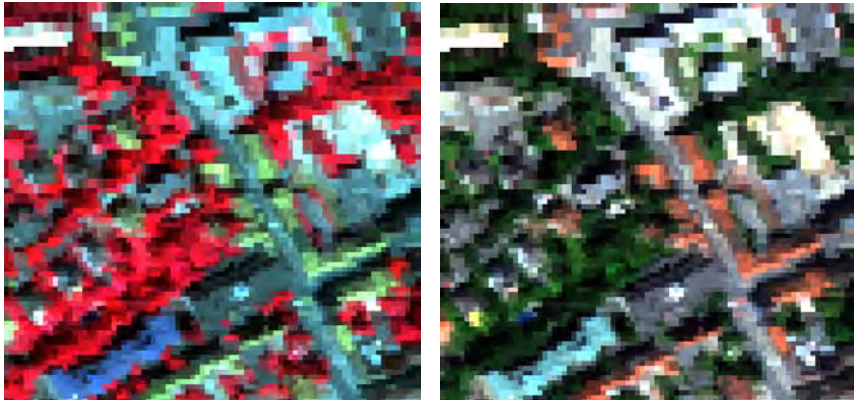


Abb. 2: HyMap Szene aufgenommen am 15. Juli 2003, in einer Falschfarben infraroten Darstellung mit der Kanalkombination 33, 17, 10 (links) und rechts in einer Echtfarbendarstellung mit der Kanalkombination 16, 9, 4 (rechts).

### 3 Verfahren

#### 3.1 Fusionsverfahren

Die Ehlers Fusion ist ein Verfahren, das auf einer IHS (Intensity-Hue-Saturation) Transformation mit Filterung im Frequenzraum basiert. Um diese Fusion durchzuführen, müssen zunächst drei Kanäle der Multi/Hyperspektralaufnahme selektiert werden. Diese drei Kanäle werden in den IHS-Raum transformiert. Die panchromatische Komponente wird nun an die Intensitäts-Komponente angepasst. Die normierten Bilddaten werden durch eine zweidimensionale Fast Fourier Transform (FFT) in den Frequenzraum überführt.

Die Fourier Transformation (FT) ist ein Verfahren zur Zerlegung eines Signals in eine Summe von Sinus- und Cosinusfunktionen unterschiedlicher Frequenzen, wobei eine FFT die Auswertung der diskreten Fouriertransformation schneller als alle anderen bekannten Algorithmen ermöglicht. Die Beschleunigung gegenüber der direkten Berechnung beruht darauf, dass der Algorithmus die Anzahl der zur Auswertung erforderlichen Multiplikationen und Additionen reduziert. Dies geschieht durch Vermeidung der Berechnung sich gegenseitig aufhebender Terme. Zur genauen Wirkungsweise dieses Algorithmus sei an dieser Stelle auf BRIGHAM (1997) verwiesen.

Durch Analyse des Fourierspektrums können isotrope Hoch- bzw. Tiefpassfilter entworfen werden. Dabei wird die hochfrequente Information aus dem panchromatischen Bild und die nie-

derfrequente Information aus dem multispektralem Bild herausgefiltert. Zum Filterentwurf für die Intensitätskomponente des multispektralen Bildes wird davon ausgegangen, dass alle Informationen in den Frequenzbändern oberhalb einer gewissen Grenzfrequenz nur künstlich erzeugt wurden. Das Reformatieren auf die Pixelgröße des panchromatischen Bildes erzeugt eine künstliche Erhöhung der räumlichen Auflösung, die keine echte Informationsverdichtung darstellt. Diese Frequenz lässt sich anhand des Verhältnisses der Bodenauflösung beider Bilder bestimmen. Idealerweise wirken die Filter genau entgegengesetzt, d.h. der Tiefpassfilter für die multispektrale Komponente filtert genau die Frequenzen heraus, die beim Hochpassfilter des panchromatischen Bildes durchgelassen werden. Die Filterung wird im Frequenzraum durch Multiplikation mit den isotropen Filtern durchgeführt. Um das Problem des Gibb'schen Phänomens (Oszillationen im Ortsbereich bei Rechteckfilterung) zu vermeiden, werden die Filter durch ein Hanning Fenster geglättet und es wird ein geringer Überlappungsbereich akzeptiert. Weitere Informationen zur Filterung im Frequenzraum können in EHLERS (1983) gefunden werden. Nach der Filterung im Frequenzraum werden die Bilddaten durch eine inverse FFT in den Ortsraum zurücktransformiert.

Die gefilterten Bilder werden danach addiert, so dass der hochfrequente Anteil des hoch auflösenden Bildes in den niederfrequenten Anteil der niedrig auflösenden Aufnahme integriert wird. Darauf erfolgt eine Histogrammanpassung der fusionierte Komponente an die ursprüngliche Intensitätskomponente des Multispektralbildes, um eine optimale Grauwertanpassung zu gewährleisten. Aus der fusionierten Intensitätskomponente und den ursprünglichen Farbwert- und Sättigungswert-Komponenten des Multispektralbildes wird ein neues IHS-Bild erzeugt. Über eine inverse IHS-Transformation wird dieses dann zurück in ein RGB-Bild umgewandelt, welches nun die hohe Auflösung des panchromatischen Bildes und die spektralen Charakteristika des multispektralen Bildes enthält. Wurden mehr als drei Kanäle im Multispektralbild verwendet, werden sukzessive jeweils drei der Kanäle ausgewählt und mit den panchromatischen Daten fusioniert. Anschließend werden alle Kanäle zu einem vollständigen neuen multispektralen Bild zusammengefügt, welches wieder alle ursprünglichen Kanäle, allerdings mit entsprechender Verbesserung der räumlichen Auflösung, enthält (EHLERS & KLONUS, 2004).

Der Vorteil der Ehlers Fusion gegenüber anderen Verfahren ist die adaptive Filteranpassung. Wird auf Farbtreue gesetzt, so kann das hoch auflösende Bild stärker gefiltert werden wodurch die spektralen Werte sich weniger verändern. Soll die räumliche Struktur stärker betont werden, so wird das hoch auflösende Bild mit einem Hochpassfilter mit niedriger „cut off“ Frequenz gefiltert. Dadurch werden im fusionierten Bild Geoobjekte stärker betont, wobei eventuell eine spektrale Veränderung in Kauf genommen werden muss.

### 3.2 Evaluierungsverfahren

Die fusionierte Szene wurde sowohl visuell als auch statistisch verglichen. Bei der quantitativen Analyse wurden zunächst Evaluierungsverfahren ausgewählt, welche die spektralen Aspekte bewerten, dazu werden Korrelationskoeffizienten, die Abweichung pro Pixel und ein SSIM (Structure Similarity Index) verwendet. Zudem werden Spektralkurven von einzelnen Objekten vor und nach der Fusion betrachtet. Um auch die Verbesserung der räumlichen Auflösung zu evalu-

ieren, werden Kantendetektionsfilter und Hochpassfilter mit anschließender Korrelationsbestimmung eingesetzt.

Um die spektralen Aspekte zu bewerten, wurde die fusionierte Szene auf die räumliche Auflösung der originalen hyperspektralen Szene (3 m) reformatiert. Die Korrelationskoeffizienten werden zwischen der originalen hyperspektralen Szene und der reformatierten fusionierten Szene für jeden Kanal berechnet. Die höchste Korrelation wird durch den Wert 1 repräsentiert, die geringste durch -1.

Für die Grauwertabweichung pro Pixel (WALD 2002, S. 147-160) wird die reformatierte fusionierte Szene von der hyperspektralen Szene subtrahiert und der Absolutwert extrahiert. In einem letzten Schritt wird dann die durchschnittliche Abweichung pro Pixel ermittelt. Je geringer die mittlere absolute Abweichung ist, desto größer die Übereinstimmung.

Der SSIM (Structure Similarity Index) von WANG et al. (2004) ist ein Verfahren, das die Helligkeit, den Kontrast und die Struktur des Bildes vergleicht. Dieser Index wird für ein lokales 8 x 8 Pixel umfassendes Fenster berechnet. Das Fenster wird Pixel für Pixel über das gesamte Bild geschoben. Bei jedem Schritt werden die lokalen Statistiken und der SSIM Index in diesem Fenster berechnet. Der Wert variiert zwischen 0 und 1. Die höchste Korrespondenz mit dem Original zeigen Werte von 1.

Zur Messung der Hochpass-Korrelationskoeffizienten (ZHOU et al. 1998) werden das panchromatische und jeder Kanal der fusionierten Szene Hochpassgefiltert. Die Korrelationskoeffizienten werden dann zwischen dem hochauflösenden Bild und jedem Kanal der fusionierten Szene berechnet. Die Korrelation wird im gefilterten Bild gemessen, da die Kanten die Information beinhalten, die aus dem hochauflösenden Bild kommen soll. Es sollen dabei keine spektralen Informationen aus dem hochauflösenden Bild in das fusionierte übernommen werden.

Für die Kantendetektion wird zunächst ein Sobel Filter auf das hochauflösende Bild angewandt. Ebenso wird dieser Filter auf jeden Kanal des fusionierten Bildes angewandt. Anschließend wird die Anzahl der erkannten Ecken im hochauflösenden Bild ermittelt, die ebenso im fusionierten Bild noch extrahiert werden können. Die Angabe der Werte folgt in Prozent. Ein Wert von 100% bedeutet, dass sämtliche Kanten aus dem hochauflösenden Bild erkannt im fusionierten Bild zu finden sind.

## 4 Diskussion

Bei dieser Untersuchung wurden die Daten des LEO mit den hyperspektralen HyMap Daten mittels der Ehlers Fusion integriert. Die Ergebnisse werden in Abb. 3 gezeigt. Bei der visuellen Auswertung wurde zunächst jeder Kanal einzeln betrachtet und mit dem Original verglichen. Danach wurden zwei gebräuchliche Bandkombinationen betrachtet, wobei wir uns auf das Echtfarben und das Falschfarbeninfrarotbild konzentrierten. Diese Spektralkombinationen sind auch in der analogen Luftbildauswertung die gebräuchlichsten und weisen daher die größte Kongruenz zur klassischen Luftbildinterpretation auf. Beim visuellen Vergleich zeigt sich, dass die Farben nahezu unverändert in dem fusionierten Bild erhalten bleiben. Einzig aufgrund der erhöhten räumlichen Auflösung sind einige Pixel leicht verändert.

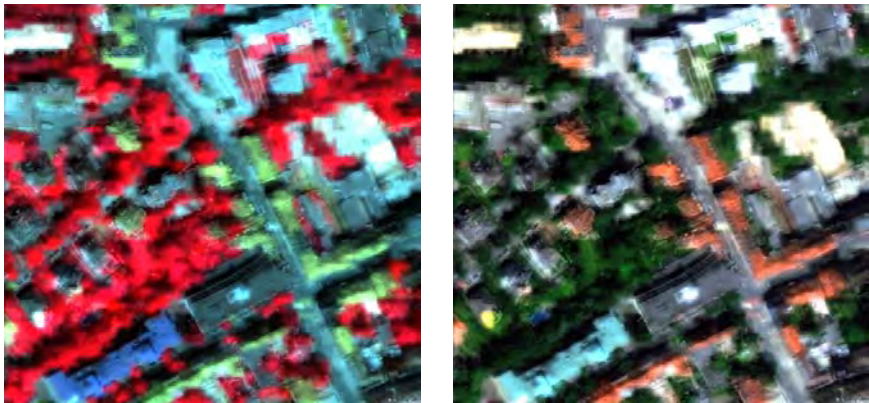


Abb. 3: Fusionierte HyMap Szenen in einer Falschfarben infrarot Darstellung mit der Kanalkombination 33, 17, 10 (links) und rechts in einer Echtfarbandarstellung mit der Kanalkombination 16, 9, 4.

Da die visuelle Analyse subjektiv ist und vom Interpreten stark beeinflusst wird, wurden außerdem quantitativ-statistische Analysen durchgeführt. Die Ergebnisse der statistischen Analyse für die Ehlers Fusion zeigt die Tab. 2. Korrelations- und SSIM-Werte bestätigen die sehr gute Farberhaltung des Fusionsverfahrens. Die Abweichung pro Pixel in der zweiten Zeile erscheint mit 209,81 zunächst im Mittel recht hoch, wobei allerdings die HyMap Szene in 16 bit aufgenommen wurde und einen Maximalwert von knapp 18.000 für diesen Ausschnitt besitzt. Dieser Wert entspricht einer Abweichung von weniger als 2% und würde bei 8 bit Daten einen Wert von ca. 4 Grauwerten entsprechen.

Möchte man dennoch eine geringere Abweichung erreichen, müssen die Filter bei der Ehlers Fusion anders gesetzt werden. Die Informationen des hyperspektralen Bildes werden schwächer gefiltert und werden dadurch stärker berücksichtigt. Andererseits werden die panchromatischen Informationen stärker gefiltert und beeinflussen das fusionierte Bild geringer. Dann allerdings sieht das fusionierte Bild weniger räumlich verbessert aus, die Grauwerte des originalen hyperspektralen Bildes sind als Raster noch gut zu erkennen.



Tabelle 2 zeigt beide Ergebnisse der statistischen Untersuchung. Bei der Fusion „Ehlers spektral“ erkennt man eine eindeutige Verbesserung der spektralen Ergebnisse, die Abweichung pro Pixel liegt nur noch bei 78,13. Es ist jederzeit möglich die Filter weiter abzuändern. Dies ist aber sicherlich von der Anwendung und der Weiternutzung abhängig. Die räumliche Verbesserung dagegen zeigt schlechtere Ergebnisse als in Tab. 2, denn die Betonung wurde beim zweiten fusionierten Bild auf die spektrale Komponente gesetzt. Ansonsten zeigen die Werte der Untersuchungen, zur räumlichen Verbesserung in beiden Szenen akzeptable Werte, eine Verbesserung der geometrischen Auflösung ist eindeutig zu erkennen.

	<b>Korrelation</b>	<b>Abweichung pro Pixel</b>	<b>SSIM</b>	<b>Hochpass Korrelation</b>	<b>Kantendetektion</b>
Ehlers	0,9703	209,81	0,9274	0,8704	87,51 %
Ehlers spektral	0,9958	78,13	0,9872	0,6204	83,53 %

Tab. 2: Ergebnisse der quantitativ statistischen Evaluierung

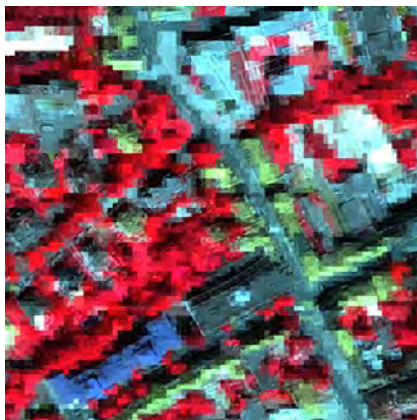


Abb. 4: Fusionierte HyMap Szenen in einer Falschfarbeninfrarot-Darstellung mit der Kanalkombination 33, 17, 10. Verwendet wurde die „Ehlers spektral“ Fusionsoption.

Zusätzlich wurden für unterschiedliche Materialien Spektralkurven gemessen, um die Veränderungen pro Pixel festzustellen. Insgesamt wurden 12 Objektarten betrachtet, wobei die Abbildungen 5 und 6 die Spektralkurven für Asphalt und Kupferdächer darstellen. Generell zeigt das fusionierte Bild (blaue Linie) höhere Werte (Ausnahme: Vegetation). Die Struktur der Kurven bleibt aber im Wesentlichen die gleiche. Ob diese Veränderungen Auswirkungen auf eine Klassifikation haben, muss allerdings noch getestet werden. Benutzt man dagegen bei der Fusion die „Ehlers spektral“ Option, so erhält man als Ergebnis spektrale Verteilungskurven, die nahezu identisch mit dem Original sind.

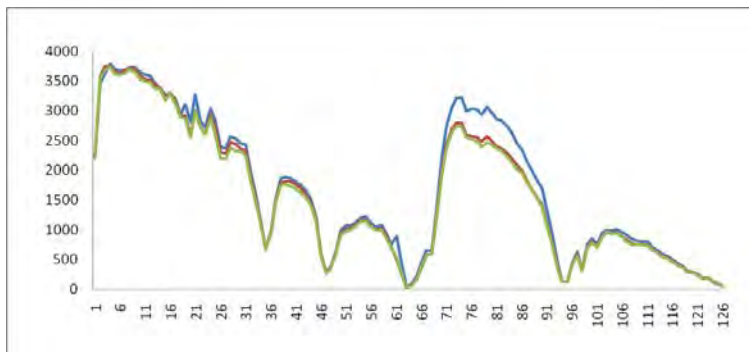


Abb. 5: Spektralkurve für Asphalt: Original (Rot), fusionierte Szene (Blau) und fusionierte Szene mit Betonung auf die spektrale Eigenschaften (Grün).

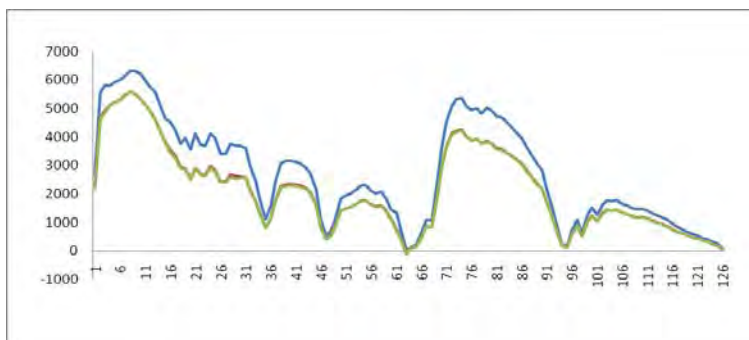


Abb. 6: Spektralkurve für ein Kupferdach: Original (Rot), fusionierte Szene (Blau) und fusionierte Szene mit Betonung auf die spektrale Eigenschaften (Grün).

## 5 Bewertung

Während die visuelle Auswertung eine deutliche räumliche Verbesserung zeigt und die spektralen Werte durch die Darstellung am Bildschirm optisch kaum verändert werden, ist bei der statistischen Analyse die Grauwertabweichung pro Pixel klar sichtbar. Allerdings bleiben die Spektren in ihren wesentlichen Merkmalen unverändert. Ob dies positive oder negative Auswirkungen auf eine Klassifikation hat, muss allerdings noch getestet werden. Die Ehlers Fusion bietet außerdem ein adaptives Filterdesign, so dass diese Grauwertabweichung stark verringert werden kann, wodurch der Bildinhalt aber wesentlich pixeliger wirkt. Je nach Anwendung muss daher entschieden werden, welche Eigenschaften für das fusionierte Bild gewünscht werden. Die räumliche Verbesserung der Daten ist deutlich sichtbar und wird auch statistisch bestätigt. In weiteren Forschungsarbeiten soll die Auswirkungen der Fusion auf Klassifikation von hyperspektralen Daten getestet werden.

## 6 Literaturverzeichnis

- ALPARONE, L.; AIAZZI, B.; BARONTI, S.; GARZELLI, A. & NENCINI, F., 2006: A critical review of fusion methods for true colour display of very high resolution images of urban areas. 1st EARSeL Workshop of the SIG Urban Remote Sensing, Humboldt-Universität zu Berlin, 2-3 March 2006, CD-Publikation.
- BÄUMKER, M.; HAHN, H.; HEIMES, F.-J. & VESTJENS, G., 2003: Ein strenges funktionales Modell für die direkte Georeferenzierung und modellgestützte Regelung einer Fernerkundungsplattform. In: Seyfert, E. (Hg.) Auf dem Weg zu operationellen Prozessketten in Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation. Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., S. 15–41.
- BRIGHAM, E. O., 1997: FFT Anwendungen. Oldenbourg Verlag, München.
- COCKS, T.; JENSSEN, R.; STEWART, A.; WILSON, I. & SHIELDS, T., 1998: The hymap airborne hyperspektral sensor: The system, calibration and performance. In: Schaepman, M., Schläpfer, D. and Itten, K. I. (Hg.) 1st EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, 6-8 October 1998, Zurich. S. 37–43.
- EHLERS, M., 1983: Untersuchung von digitalen Korrelationsverfahren zur Entzerrung von Fernerkundungsaufnahmen. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 121, Dissertation, 248 pp.
- EHLERS, M. & KLONUS, S., 2004: Erhalt der spektralen Charakteristika bei der Bildfusion durch FFT basierte Filterung. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation (PFG), 6/2004, 495–506.
- EHLERS, M. & KLONUS, S., 2008: Quality Assessment for Multi-Sensor Multi-Date Image Fusion. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVII, Part B4, Beijing 2008. 499-506.
- GREIWE, A., 2006: Detektion von Referenzspektren in multisensoralen Bilddaten. Universität Osnabrück (Dissertation).
- KLONUS, S. & EHLERS, M., 2007: Image fusion using the Ehlers spectral characteristics preserving algorithm. GIScience and Remote Sensing, 44(2), 93–116.
- MICHEL, U.; KLONUS, S.; EHLERS, M. & ÅSTRAND, P. J., 2008: Image Fusion of Multitemporal and Multisensoral Data. In M.A. Gomasca (Editor): Geoinformation in Europe, 257-266.
- POHL, C. & VAN GENDEREN, J.L., 1998: Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. International Journal of Remote Sensing, vol. 19, 823–854.
- WALD, L., 2002: Data fusion - Definitions and architectures - Fusion of images of different spatial resolutions. École de Mines de Paris, F.
- WANG, Z.; BOVIK, A. C.; SHEIKH, H. R. & SIMONCELLI, E. P., 2004: Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity. IEEE Transactions on Image Processing, 13(4), 600–612.
- ZHOU, J.; CIVCO, D.L. & SILANDER, J.A., 1998: A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data. International Journal of Remote Sensing, 19(4), 743–757.

## **Skalenspezifische hyperspektrale Fernerkundung mit dem Airborne Imaging Spectrometer for Application (AISA-EAGLE/HAWK 400-2500nm)**

**ANGELA LAUSCH<sup>1</sup> & MARION PAUSE<sup>2</sup>**

*Zusammenfassung: Hyperspektraldaten stellen für die Forschung eine sehr bedeutsame Auswertgrundlage dar, da sie aufgrund ihrer geometrischen als auch spektralen Eigenschaften eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsgebiete (z.B. Gewässerzustandserfassung, Vegetationsklassifizierungen, Charakterisierung physikalisch-biochemischer Vegetationsparameter, Strukturierung und Zusammensetzung des Bodens, Erfassung von großflächigen Bodenkontaminationen) eröffnen. Es besteht somit ein sehr hoher Bedarf an Hyperspektralinformationen. Der Einsatz von kommerziellen Hyperspektraldaten ist jedoch mit einer Vielzahl von Problemen verbunden. So sind Forschungen hinsichtlich unterschiedlichen räumlich/hierarchischer als auch zeitlichen Skalen mit Hyperspektraldaten nur sehr schwer möglich, andererseits existieren keine Untersuchungen zu kausalen Zusammenhängen zwischen abbildenden Hyperspektralsignalen und interessierenden Zielgrößen. Am HELMHOLTZ Zentrum für Umweltforschung UFZ Leipzig wurde eine skalenspezifische hyperspektrale Fernerkundung auf Grundlage der Sensoren AISA-EAGLE (400-970nm) und AISA-HAWK (970-2500nm) etabliert. In drei unterschiedlichen Skalen (Laborversuch 1m<sup>2</sup>, Hebebühne 100m<sup>2</sup>, sowie auf Flugzeugmesskampagne 10km<sup>2</sup>) werden intensive Untersuchungen zum raum/zeitlichen Verhalten von physikalisch/chemisch und biologischen Zustandsgrößen in der Vegetation/Boden/Wasser und dem Hyperspektralsignal durchgeführt.*

### **1 Einleitung**

Das HELMHOLTZ Zentrum für Umweltforschung UFZ Leipzig ist eine Großforschungseinrichtung mit dem Schwerpunkt der Umweltforschung. Um eine umfassende Prozessforschung in Landschaften und Ökosystemen zu garantieren, wurden eigens hierfür Instrumente zur Durchführung einer eigenen skalenspezifischen hyperspektralen Fernerkundung zur Verfügung gestellt. Grundlage der Hyperspektralfernerkundung stellen die beiden Sensoren AISA-EAGLE (400-970nm) und AISA-HAWK (970-2500nm) dar - Airborne Imaging Spectrometer for Applications (AISA, MÄKISARA 1993). Beide geometrisch als auch spektral hochauflösenden Sensoren werden auf einem UFZ eigenen Ultraleichtflugzeug eingesetzt. Durch einen speziellen Spiegelaufsatz ist auch ein Einsatz der abbildenden Hyperspektralsensoren auf einer Hebebühne sowie im Speziallabor möglich.

Die ständige Verfügbarkeit der Sensoren garantiert insbesondere für die Vegetationsanalyse Datenaufzeichnungen zu relevanten Entwicklungszeitpunkten, sowie die Bereitstellung von Zeitreihen.

1) Angela Lausch, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Department Computational Landscape Ecology, Permoser Str. 15, D-04318 Leipzig, Germany, E-Mail: angela.lausch@ufz.de

2) Marion Pause, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Department Computational Landscape Ecology, Permoser Str. 15, D-04318 Leipzig, Germany, E-Mail: marion.pause@ufz.de

Der Einsatz der Sensoren im Labor ermöglicht darüber hinaus problemspezifische Analysen von Hyperspektraldaten in Abhängigkeit kontrollierter Pflanzenstress verursachender Faktoren. Ergänzend zu Flugkampagnen kann die Hebebühne als Aufnahmeplattform zusätzlich in das „Ground Truthing“ integriert werden, um räumlich sehr hochauflösende spektrale Informationen über die Sub-Pixel Heterogenität der Flugzeugdaten zu erhalten. Weiterhin eignet sich die Hebebühne für mobile Einsätze über kontrollierten Freilandversuchen, u.a. auch ergänzend zu Laborversuchen.

## 2 Problemstellung

Hyperspektraldaten stellen für die Forschung eine sehr bedeutsame Auswertegrundlage dar, da sie aufgrund ihrer geometrischen als auch spektralen Eigenschaften eine Vielzahl unterschiedlichster Anwendungsgebiete (z.B. Gewässerzustandserfassung, Vegetationsklassifizierungen, physikalisch-biochemische Vegetationsparameter, Strukturierung und Zusammensetzung des Bodens, Erfassung von großflächigen Bodenkontaminationen) eröffnen. Es besteht somit einerseits ein sehr hoher Bedarf an Hyperspektralinformationen, andererseits ist der Einsatz von kommerziellen Hyperspektraldaten mit einer Vielzahl von Problemen verbunden.

- 1.) Forschungen hinsichtlich unterschiedlichen räumlich/hierarchischer als auch zeitlichen Skalen mit Hyperspektraldaten sind nur sehr schwer möglich.
- 2.) Untersuchungen kausaler Zusammenhänge zwischen Hyperspektralsignalen und interessierender Größen fehlen.
- 3.) Die thematische Ausrichtung hyperspektraler Fernerkundungsanalysen wird Mangels geeigneter Daten (z.B. Aufnahmezeitpunkt) nicht selten vorhandenen Daten „angepasst“.

Folgende Ursachen liegen diesen Problemen zugrunde:

- Es besteht ein sehr hoher zeitlicher, finanzieller und personeller Aufwand für die Planung und Durchführung einer Flugmesskampagne (z.B. HYMAP / Befliegung = 15 TEuro).
- Die zeitliche Planung der Flugmesskampagne erfolgt aufgrund hoher Bedarfsanfragen oft bereits viele Monate bis sogar Jahre vorher. Hierdurch werden zeitliche „Befliegungsfenster“ festgelegt, die nicht selten eine hohe Diskrepanz zu einerseits optimalen Strahlungswetter als auch den zeitlichen Erfordernissen des Forschungszieles (Phänologiestadien) führen.
- Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher (geometrischer und spektraler Auflösungen auf die Entstehung von Mischsignalen) räumlicher Skalen auf das Spektralverhalten (Mischsignal) ist sehr oft nicht möglich, da Flugmesskampagnen aufgrund von zeitlichen und finanziellen Engpässen oft nur in einer jeweils vorher definierten Flughöhe durchgeführt werden.
- Durch die hohen zeitlichen und finanziellen Engpässe werden hyperspektrale Flugmesskampagnen nur in einer geringen zeitlichen Frequenz von ca. 3 Befliegungen pro Jahr durchgeführt. Konkrete Aussagen zu wirklich existierenden kausalen Zusammenhängen zwischen Spektralsignalen und physikalisch- biochemischen Parametern von Vegetation, Boden und Wasser sind mit einer großen Unsicherheit

verbunden. Es lassen sich aus zu wenigen zeitlichen Datensätzen keine Aussagen zum Monitoring ableiten.

Aufgrund des breiten Einsatzspektrums von Hyperspektraldaten in der Umweltforschung wird am UFZ eine skalenspezifische hyperspektrale Fernerkundung zur Untersuchung unterschiedlicher raum-zeitlicher Prozessgrößen in Strukturen und Landschaften aufgebaut. Grundlage dieser Forschungen stellen die beiden Hyperspektralsensoren AISA-EAGLE (400-970nm sowie AISA-HAWK (970-2500nm) dar (vgl. Tabelle 1, Abbildung 1, MÄKISARA, 1993).

*Skalen der Hyperspektralfernerkundung am UFZ:*

- **Skala 1) Speziallaborversuche – Airborne Imaging Spectrometer for Application (AISA-EAGLE/HAWK – 400-2500nm) + Spiegelscanner**  
Level 1: 1x1 m Versuchspartzellen, Vegetationsdecke
- **Skala 2) Hebeblühne – Airborne Imaging Spectrometer for Application (AISA-EAGLE/HAWK – 400-2500nm)+ Spiegelscanner**  
Level 2: 20x20 m Versuchspartzellen, Vegetationsdecke
- **Skala 3) Ultraleichtflugzeug - Airborne Imaging Spectrometer for Application (AISA-EAGLE/HAWK 400-2500nm)**  
Level 3: Swath = 500m, geometrische Bodenauflösung 1m, Vegetation, Boden, Fließ- und Stillgewässer, Landnutzungssysteme, Ökosysteme

Tabelle 1: Eigenschaften der Hyperspektralsensoren des UFZ

Sensor head	AISA-EAGLE VNIR				AISA-HAWK II SWIR
Sensorgewicht	11 kg				18 kg
Abmasse (Länge/Breite/Höhe)	380/220/55mm				220/275/470mm
Spektralbereich	400-970nm				970-2500nm
Spektrale Auflösung	2,9nm				8,5nm
Räumliche Auflösung bis zu	1024				320
Kameratyp	CCD Kamera				MCT Kamera
Spektrales Binning	1x	2x	4x	8x	254
Spektralbänder	488	244	122	60	
Spektrales Sampling / Band	1,25 nm	2,3 nm	4,6 nm	9,2 nm	
Bildrate	30	40	60	85	
Focal length	23 mm	18,5 mm	9 mm		22,5mm
FOV	29,9 degree	36,7 degree	62,1 degree		24,0 degree
Streifenbreite	0,53x altitude	0,66x altitude	1,20x altitude		0,43 x altitude
Bodenauflösung In 1000m Flughöhe	0,52 m	0,65 m	1,2 m		1,34
<b>Zusatzteile zum System</b>					
GPS/INS	RT3100				RT3100
Spiegelscanner	Spiegelscanner für lokale Anwendungen				Spiegelscanner für lokale Anwendungen
FODIS-Antenne	Fiber Optic Down welling Irradiance Sensor				Fiber Optic Down welling Irradiance Sensor

AISA (Airborne Imaging Spectrometer for Application)

## 2.1 Sensoreigenschaften - AISA-EAGLE/HAWK

Der Tabelle 1 sind die Sensoreigenschaften der Hyperspektralsensoren des UFZ zu entnehmen. Anhand des jeweils geplanten Forschungsgegenstandes werden im Vorfeld jeder Messkampagne (lokale Scanneranwendungen sowie Flugmesskampagnen) die hierfür spektralen als auch geometrischen erforderlichen Sensoreigenschaften bestimmt. In Abhängigkeit von der Gebietsgröße sowie den atmosphärischen Bedingungen (Thermik, Sichtverhältnisse, Strahlungsbedingungen, Wolkenbildung) werden für eine Befliegungskampagne die zu befliegenden Streifenbreiten (Swath) und jeweilige Flughöhe bestimmt.

Die Abbildung 1 zeigt die Einordnung der beiden AISA-Sensoren des UFZ gegenüber den bisher verfügbaren flugzeuggetragenen Hyperspektralsensoren und deren Sensoreigenschaften.

	AVIS-3	AVIRIS (Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer)	HyMap (Hyperspectral Mapping)	CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager)	DAS 7915 (Digital Airborne Imaging Spectrometer)	ROSIS (Reflective Optics System Imaging Spectrometer)	AISA EAGLE	AISA HAWK
				CASI-2	CASI-3			
Flugzeug- träger	Ultraleichtflug- zeug (Trike), Cessna	NASA ER-2 Jet (Flughöhe ca. 20km) oder Two Otter Lodoprop (Flughöhe ca. 4km)	unterschiedliche Flugzeugträger	Unterschiedliche Flugzeugträger	Donner 228 (DLR Coopertreffenhofen)	ab 1995 auf der DLR Falcon Jet (Flughöhe max. 10km) oder Donner 228 (Flughöhe max. 9km)	Ultraleichtflugzeug (Trike), Cessna, weitere Flugzeugträger möglich	Cessna, weitere Flugzeugträger möglich
Geometrische Bodenauflösung	2 – 10m (abhängig von der Flughöhe) 1000m × 2,5m Auflösung	4 oder 20m (abhängig von der Flughöhe) 4km (Two Otter) = 4m. 20km (ER-2) = 20m	3 – 10m	0,5 – 10m	3 – 20m (abhängig von der Flughöhe)	5 – 20m (abhängig von der Flughöhe) 10m × 50m	0,5 – 4m (abhängig von der Flughöhe) 1000m × 0,52m Auflösung	0,5 – 4m (abhängig von der Flughöhe) 1000m × 0,57m Auflösung
IFOV / FOV	1,6mrad/ 58°	1mrad/ 30°	1-3 mrad/ 30 – 65°	k.A./ 37,8° across-track, 0,077° along- track	k.A./ 40,5°	3,3 mrad / +20° auf Donner 228 max. + 38° (abhängig vom Flugzeugträger)	0,036 mrad/ 36,7°	0,075 mrad/ 24,0°
Spektrum (nm)	400-1000nm (VIS/NIR); 2006 Erweiterung um MIR bis 1700nm (UFZ-VIP)	400-2500nm	400 – 2500nm u./b. 3 – 5 µm u./b. 8 – 12 µm	545nm „spectral range“ über 400 – 1000nm	650nm „spectral range“ über 400 – 1000nm	430 – 1000 nm 1000 – 1800 nm 2000 – 2500 nm 3,0 – 5,5 µm 8,7 – 12,3 µm	430 – 850 nm (imaging mode)	400 – 870 nm
spektrale Auflösung	5nm	10nm	15 – 20nm (VIS- SWIR), 100 – 200nm (TIR)	2,2nm	15 – 30nm (0,4-1,0µm) 45nm (1,5-1,8µm) 20nm (2,0-2,5µm) 2,0nm (3,0-5,5µm) 0,0nm (8,0-12,5µm)	12nm (430 – 500nm) 4nm (554 – 630nm)	2,9 nm	8,5 nm
Anzahl der Kanäle	128	224	158 gesamt 126 (0,4 – 2,5) 32 (8 – 12 µm, TIR)	288 gesamt programmierbar je nach Anwendung	79 gesamt 32 (VIS/NIR), 8 (SWIR), 32 (SWIR II), 1 (MIR), 6 (TIR)	32 (imaging mode) 84 (spectral mode)	488	254
Bildtiefe	14 bit	12 bit	k.A.	12 bit	14 bit	15 bit	12 bit	14 bit
Verfügbar seit	1999 (AVIS- 1), seit 2001 kommerziell verfügbar	1994	1996	1989	2002	1995-	~2000	~2007/2008
Schwarzbreite/ Länge	k.A.	11 km auf ER-2 (20km HOHe), 2km auf Two Otter (4km HOHe); Streifenlänge ~10km	k.A.	512m bei 1m Auflösung (512 Pixel), vgl. Tab.	1480m bei 1m Auflösung (1480 Pixel), vgl. Tab.	vgl. FOV	~500m bei 1000m Flughöhe	~490m bei 1000m Flughöhe
Aufnahme- winkel	along-track, bis zu 7 verschiedene Viewal	nadir-viewing, Across-track (w/aklonom)	across-track	along-track (pushbroom, CCD)	k.A.	along-track (pushbroom, CCD); Tilt capacity +1-20°	along-track CCD	along-track MCT
SNR (Signal Rausch Verhältnis)	k.A.	k.A.	>500:1	420:1	480:1	>150 (VNIR); > 80 (SWIR/MIR/TIR)	k.A.	350:1/500:1
Hersteller/ Operator	Ground Truth Centre Oberbayern <a href="http://www.gtc-&lt;br/&gt;oeb.de">http://www.gtc- oeb.de</a>	NASA / Jet Propulsion Lab (JPL) <a href="http://www.jpl.nasa.gov">http://www.jpl.nasa.gov</a>	Integrated Sensing Systems Pty. Ltd. (IS²), Australia, HyVista Corp.	ITRES Research Limited <a href="http://www.itres.com">http://www.itres.com</a>	Geophysical Environmental Research (Ger) corp. Germany/ DLR	M88 (DSS), GKSS, DLR Institute of Optoelectronics	Spectral Imaging LTD (SPICoM) <a href="http://www.specim.fi">http://www.specim.fi</a>	Spectral Imaging LTD (SPICoM) <a href="http://www.specim.fi">http://www.specim.fi</a>
Quelle	<a href="http://www.gtc-&lt;br/&gt;oeb.de/">http://www.gtc- oeb.de/</a> <a href="http://141.54.&lt;br/&gt;50.121/13088&lt;br/&gt;set.htm">http://141.54. 50.121/13088 set.htm</a> (LMU Institut für Geographie)	<a href="http://www.jpl.nasa.gov">http://www.jpl.nasa.gov</a> <a href="http://www.gtc-&lt;br/&gt;oeb.de">http://www.gtc- oeb.de</a>	<a href="http://www.hvista.com">www.hvista.com</a> <a href="http://www.itres.com">http://www.itres.com</a> <a href="http://www.mimms.com">www.mimms.com</a> <a href="http://www.gtc-&lt;br/&gt;oeb.de">http://www.gtc- oeb.de</a>	<a href="http://www.itres.com/doc/av2.html">http://www.itres.com/doc/av2.html</a>	<a href="http://www.itres.com/doc/av2.html">http://www.itres.com/doc/av2.html</a> 3/1993	<a href="http://www.op.dlr.de/de/leibniz.htm">http://www.op.dlr.de/de/leibniz.htm</a> (Stand 2002), Kraemer, H.J. (1996)		

Abbildung 1: Vergleich von flugzeuggetragenen Hyperspektralsensoren

## 2.2 Skalenspezifische hyperspektrale Fernerkundung

### 2.2.1 Skala 1 – Speziallaborversuch

*Speziallaborversuche – AISA- EAGLE/HAWK – 400-2500nm,*

*Level 1: 1x1 m Versuchspartzellen, Vegetationsdecke*

Laboruntersuchungen bieten die einmalige Möglichkeit, systematische Untersuchungen von kausalen Zusammenhängen zwischen abbildenden Hyperspektralinformationen und einer Vielzahl von physikalisch/chemisch und biochemischen Parametern der zu untersuchenden Zielgrößen durchzuführen. Es kann hierbei die spektrale Response von beispielsweise Vegetation unter differenzierten Szenaren (Trockenstress, CO<sub>2</sub> Schwermetallbelastung, Wirkung von Pflanzenschutzmitteln u.a.) in einem hohen zeitlichen Aufnahmeturnus (2x wöchentlich) untersucht werden. Somit bieten sich umfangreiche Möglichkeiten zum Monitoring von einerseits parallel gemessenen physikalisch/chemischen Pflanzen- und Bodenparametern (LAI, Chlorophyllanteil a/b, Photosyntheseaktivität, Biomasse, C/N-Verhältnis der Pflanze, Bodenfeuchte, Matrixpotenzial des Bodens) und den abbildenden hochauflösenden Hyperspektralinformationen. Ein entscheidender Vorteil von Laborversuchen ist weiterhin, dass die durchgeführten Messungen immer unter den gleichen Randbedingungen wie Lichtquelle (Halogenlampen mit 4x2000W, Einstrahlungswinkel, Sensorhöhe) durchgeführt werden. Für die Hyperspektralmessungen wurde eigens hierfür eine ca. 3x3x3m große Dunkelkammer aus lichtundurchlässigem Stoff konstruiert. Somit ist gewährleistet, dass während der gesamten Versuchsreihe keine störenden Faktoren wie unterschiedliche Strahlungseinflüsse, Einstrahlungswinkel, Aufnahmehöhe einwirken, die eine klare Differenzierung des Spektralsignals und damit Untersuchung von Ursache-Wirkprozessen in der Hyperspektralfernerkundung unmöglich machen. In der Abbildung 2 sind der Versuchsaufbau im Speziallabor sowie Beispiele von Hyperspektraldaten aus vorliegenden Messuntersuchungen von Sommergerste bei unterschiedlichen Trockenstressszenarien dargestellt.

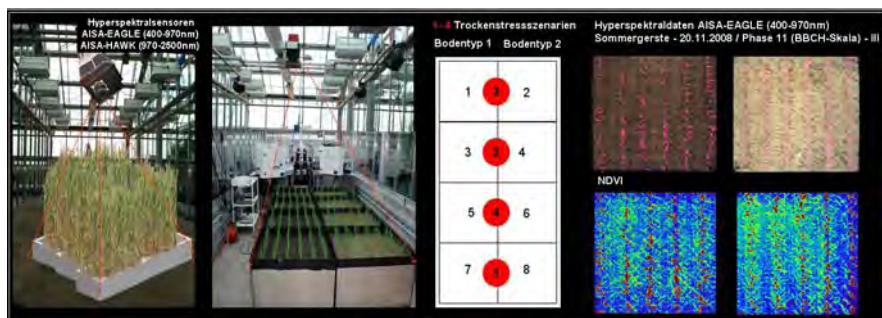


Abbildung 2: Einsatz des Hyperspektralsensors AISA-EAGLE im Speziallabor des UFZ-Bad Lauchstädt zur Untersuchung kausaler Zusammenhänge zwischen physikalischen und chemisch/biochemischen Parametern und dem Hyperspektralsignal bei Sommergerste für unterschiedliche Trockenstressszenarien



### 2.2.2 Skala 2

*Hebebühne - AISA- EAGLE/HAWK – 400-2500nm*

*Level 2: 20x20 m Versuchspartzen, Vegetationsdecke*

Mit einer Hebebühne können Versuchspartzen mit einer Flächenausdehnung von ca. 20x20m untersucht werden. Bei diesen Versuchen werden beide Hyperspektralsensoren (AISA-EAGLE/HAWK), an der Hebebühne montiert. Ziel dieser Untersuchungen ist die Erfassung kausaler Zusammenhänge zwischen abbildenden Spektralsignalen und den gemessenen Zielgrößen unter in vitro Bedingungen. Erste Versuchsreihen sind ab 2009 an 24 wägbaren Lysimetern in Brandis vorgesehen. Neben den auch im Laborversuch gemessenen Pflanzenparametern (vgl. Skala 1) werden nun auch umfangreiche Parameter in den Lysimetern (Bodentemperatur, Bewirtschaftungsparameter, Sickerwasser, Bodenwasser) sowie Klimamessdaten (Klimastation) gemessen.

### 2.2.3 Skala 3

*Ultraleichtflugzeug - AISA- EAGLE/HAWK 400-2500nm*

*Level 3: Swath = 500m, geometrische Bodenauflösung 1m, Vegetation, Boden, Fließ- und Stillgewässer, Landnutzungssysteme, Ökosysteme*

Für die Durchführung innovativer praxisrelevanter Studien mit flugzeuggetragenen hochauflösenden Hyperspektraldaten wird am Umweltforschungszentrum ein Ultraleichtflugzeug (Trike, D-MUFZ) eingesetzt. Mit dem Trike als Sensorplattform werden Hyperspektraldaten hoher räumlicher als auch zeitlicher Auflösung unter in vitro Landschaftsbedingungen aufgenommen (vgl. Abbildung 4 und Abbildung 5). In Abbildung 3 ist der Einbau des Hyperspektralsensors AISA-EAGLE mit der GPS/INS Einheit (RT3100) am Ultraleichtflugzeug sowie das UL selbst im Einsatz zu sehen. Bei der Nutzung eines Trikes als Sensorplattform müssen unterschiedliche Vor- und Nachteile abgewogen werden.

*Vorteile der Nutzung eines Ultraleichtflugzeug (Trike):*

- Zeitliche Flexibilität (hohe Wiederholrate der Aufnahmen)
- Unabhängigkeit in Projektplanung, Durchführung der Flugzeugkampagnen
- Piloten, Operator sind Mitarbeiter der Forschungseinrichtung
- Geringe Haltings-, Instandsetzungs- und Wartungskosten für ein Trike
- Konstruktion des Trikes ermöglicht vielfältige Einsatzgebiete im Ausland (Verpackung von Flugzeug)

*Nachteile der Nutzung eines Ultraleichtflugzeug (Trike):*

- Höherer Einfluss der Thermik auf die Flugzeugstabilität
- Schwierigere Handhabung für den Operator auf dem Flugzeug
- Räumliche Ausdehnung der Aufnahmegebiete begrenzt (bis ~10 km<sup>2</sup>)



Abbildung 3: Eingebauter Hyperspektralsensor AISA-EAGLE (400-970nm) sowie GPS/INS im Ultraleichtflugzeug (Trike) des UFZ

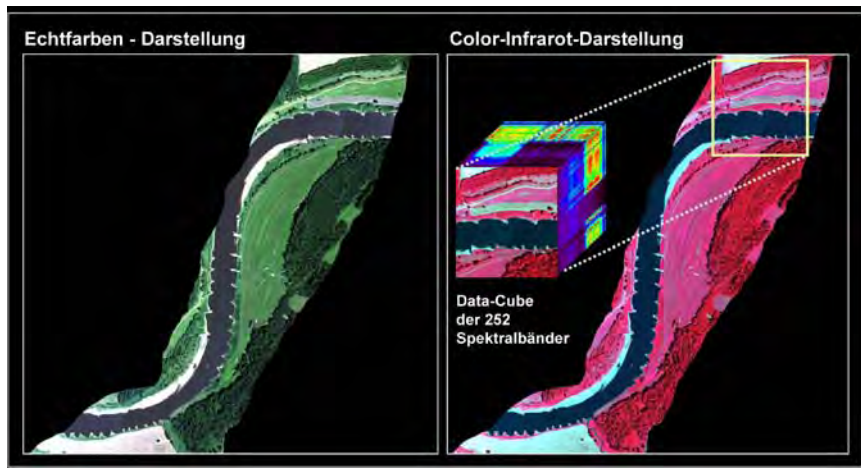


Abbildung 4: „Schleusenheger Wiesen“ bei Dessau, Aufnahme mit Hyperspektralsensor AISA-EAGLE, 400-970nm, 1m Bodenauflösung, 252 Spektralbänder, Aufnahmedatum 03.07.2008 mit dem UL des UFZ, Dr. Angela Lausch

### 3 Zusammenfassung

Mit der Entscheidung zum Aufbau einer forschungseigenen Hyperspektralfernerkundung wurde ein entscheidender Schritt in der Hyperspektralforschung getan. Durch den Kauf der beiden Sensoren AISA-EAGLE und AISA-HAWK sowie des Ultraleichtflugzeuges als Sensorplattform wird eine enorme Flexibilität in der Anwendung, Planung, Durchführung und Auswertung von eigens gewonnener Hyperspektralinformationen erreicht. Die am UFZ aufgebauten 3 Skalen der hyperspektralen Fernerkundung bieten für die Zukunft ein planbares Forschungsinstrument, mit dessen Hilfe einerseits kausale Zusammenhänge zwischen Objektzuständen und Spektralsignal

sowie andererseits eine raum-zeitliche Quantifizierung und Monitoring von Vegetation/Boden/Wasser sowie deren Zustände in der Landschaft möglich sind.

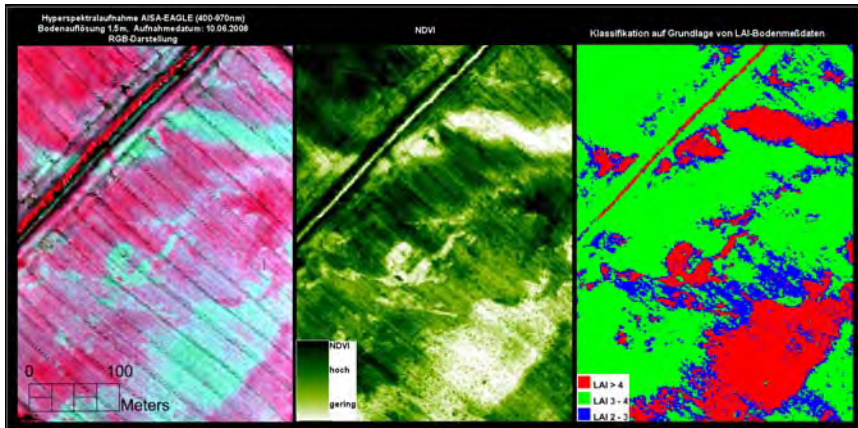


Abbildung 5: Hyperspektralaufnahme AISA-EAGLE (400-970 nm), Bodenauflösung 1,5m, Wintergerste, Aufnahme datum 10.06.2008, RGB-Darstellung, NDVI Berechnung, Klassifikationsergebnis (Spectral Angle Mapper) auf Grundlage von LAI-Bodenmessdaten

## 4 Literaturverzeichnis

MÄKISARA, K.; MEINANDER, M.; RANTASUO, M.; OKKONEN, J.; AIKIO, M.; SIPOLA, K.; PYLKKÖ, P. & BRAAM, B., 1993: Airborne Imaging Spectrometer for Applications (AISA), Digest of IGARSS'93, 2, 479– 481 (Tokyo, Japan), 1993.

# Kalibrierung und Standards für digitale Luftbildkameras

MICHAEL CRAMER<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Dieser Beitrag diskutiert eine aktuelle Fragestellung im Umfeld der digitalen Luftbildaufzeichnung: Die digitalen Systeme verdrängen zunehmend die klassischen Reihennesskameras. Dennoch sind die zukünftige Kalibrierung der Systeme im Labor bzw. mit in-situ Ansätzen, neue Methoden zur unabhängigen und umfassenden regelmäßigen Validierung der Systemqualität in Testfeldern oder die Entwicklung von neuen Standards noch weitgehend ungelöst bzw. nicht vorhanden. Am Beispiel der aktuellen nationalen und internationalen Arbeiten des USGS (United States), der EuroSDR (Europa) und DIN (Deutschland) bzw. ISO (international) werden diese Punkte kurz beleuchtet.*

## 1 Einleitung

Digitale Luftbildkamerasysteme finden immer stärkere Verbreitung auch im operationellen Umfeld. Selbst wenn man zunächst nur die drei großformatigen Systeme ADS (Leica Geosystems), DMC (Intergraph) und Ultracam (Vexcel Imaging) berücksichtigt, muss von Stückzahlen von ca. 250 am Markt etablierten Systemen ausgegangen werden. Berücksichtigt man, dass die ersten kommerziellen Systeme zwar bereits in 2000 offiziell vorgestellt wurden, die eigentlichen Verkäufe aber kaum vor Ende 2002 begonnen haben, so müssen von den drei Herstellern durchschnittlich 40 Kameras pro Jahr dementsprechend mehr als 15 Systeme pro Hersteller und Jahr verkauft worden sein. Damit sind die seitens der Hersteller gemachten Prognosen (CRAMER 2005) sogar übertroffen worden. Dieses trifft umso mehr zu, als dass neben den bereits erwähnten Produkten weitere Systeme und Hersteller am Markt verfügbar sind, die zur Verbreitung der digitalen Aufnahmetechnologien beitragen: In diesem Zusammenhang sind vor allen Dingen diejenigen Systeme zu nennen, die zunächst nur etwas kleinere Sensorformate realisieren, heute zunehmend aber auch als Mehrkopfkongfigurationen erhältlich sind und damit in Sensorformate vordringen, die bisher nur von den obigen großformatigen Systemen abgedeckt werden konnten (z.B. DigiCAM (IGI), DiMAC (Dimac-Systems), AIC (Trimble Rolleimetric)). Interessanterweise haben die Hersteller Intergraph, Vexcel und Leica Geosystems zwischenzeitlich auch solche mittelformat-basierte Kamerasysteme entwickelt (RMK D, Ultracam-L, RCD105) offensichtlich, um in Ergänzung zu den großformatigen Systemen auch eigene kostengünstigere Möglichkeiten zum Einstieg in die digitale Bildaufzeichnung anbieten zu können. Aber auch die großformatigen Systeme selbst unterliegen einer kontinuierlichen Fortentwicklung. Dies wird zum Beispiel ersichtlich in der Evolution der ADS40 (SH40) (Stand 2000) zur ADS40 (SH51/52) bis hin zur ADS80 (Stand 2008), oder von der Ultracam-D (Stand 2003) über die Ultracam-X hin zur aktuellen Ultracam-Xp (Stand 2008). Kennzeichnend bei der Fortentwicklung der Ultracam war die kontinuierliche Vergrößerung der Bildformate, bei der ADS wurde die Anordnung der Zeilen in der Fokalebene geändert. Parallel erfolgten Verbesserungen in der Sensorelektronik und sensornahen Software. Weitere Informationen zum

---

<sup>1</sup> M. Cramer, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24D, 70174 Stuttgart, E-Mail: michael.cramer@ifp.uni-stuttgart.de

Status können z.B. der Marktübersicht von LEMMENS (2008) entnommen werden, wobei die im Rahmen des ISPRS Kongress 2008 in Beijing erfolgten Neuentwicklungen dort noch nicht enthalten sind. Aus obigen kurzen Ausführungen werden die Vielfalt der Systeme und deren unterschiedlichen Konzepte bereits offensichtlich. Dieses ist der wesentliche Unterschied zu der bisherigen klassischen Bildaufnahme mit großformatigen analogen Luftbildkamerasystemen, die zwar auch von verschiedenen Herstellern angeboten wurden, aber in ihrer Grundkonzeption doch sehr vergleichbar waren. Dieses hat natürlich nicht nur Auswirkungen auf die sich anschließende Prozesskette, sondern auch auf den Bereich der Systemkalibrierung, und damit auch den Nachweis der Systemqualität.

Laut DIN 1319 wird Kalibrierung wie folgt definiert: "Ermitteln des Zusammenhangs zwischen Messwert oder Erwartungswert der Ausgangsgröße und dem zugehörigen wahren oder richtigen Wert der als Eingangsgröße vorliegenden Messgröße für eine betrachtete Messeinrichtung bei vorgegebenen Bedingungen." Für bisherige analoge Kameras wird dieses im Rahmen der geometrischen Kamerakalibrierung durch Goniometer oder Multi-Kollimatoren realisiert. Die Ergebnisse werden in einem Kalibrierschein dokumentiert. Das Kalibrier- und Messzentrum der Firma Carl Zeiss Oberkochen, üblicherweise zuständig für die Kalibrierung der analogen Zeiss Reihenmesskameras, ist durch den Deutschen Kalibrierdienst / Physikalisch Technische Bundesanstalt autorisiert Kalibrierungen durchzuführen (so genannte auf nationales Normal rückführbare Kalibrierung). Der Kalibrierschein bzw. -zertifikat liefert den unabhängigen Nachweis, dass das Kamerasystem die angegebenen Spezifikationen erfüllt. Die Zertifikate werden durch europäische und internationale Kooperationen gegenseitig anerkannt. Durch regelmäßige Rekalibrierungen (üblicherweise im 2-3-jährigen Rhythmus) wird sichergestellt, dass die bestimmten Kameraparameter noch Gültigkeit besitzen.

Diese bisher angewandten Verfahren müssen für die digitalen Kameras grundlegend überdacht bzw. neu entwickelt werden. Bisher sind bei den Herstellern (noch) keine autorisierten bzw. international anerkannten Verfahren zur (geometrischen) Kamerakalibrierung vorhanden. Es ist zudem eine Verlagerung von den in kontrollierbaren Umgebungen durchgeführten Laborkalibrierungen hin zu in-situ Verfahren zu erkennen. Dieses wurde ursächlich hervorgerufen durch die Tatsache, dass nicht alle Beziehungen zwischen einzelnen Komponenten des Aufnahmesystems im Sinne einer Gesamtsystemkalibrierung im Labor bestimmt werden können (z.B. der Bezug zwischen GPS/Inertial-Komponenten und Kamera oder für Mehrkopfkamerasysteme die Ausrichtung der einzelnen Kameraköpfe zueinander). Prinzipiell bieten die Methoden der in-situ Kalibrierung aber die Möglichkeit, nicht nur obige Komponenten sondern auch das System als Ganzes zu kalibrieren und damit auf zusätzlichen Messaufwand im Labor verzichten zu können. Im Falle der ADS werden z.B. zur geometrischen Kalibrierung keine klassischen Labormessungen durch Goniometer mehr durchgeführt. Die Verzeichnungsparameter der Optik werden ausschließlich durch in-situ Kalibrierung gewonnen, ausgehend von den für die Produktion spezifizierten Optikparametern (TEMPELMANN & HINSKEN 2007). So genannte „burn-in flights“ sind auch fester Bestandteil der herstellenseitigen Kalibrierung für DMC und Ultracam. Mit diesen Flügen ist auch ein objektiver Nachweis möglich, ob die Systemanforderungen für eine bestimmte Anwendung unter realen Einsatzbedingungen erfüllt worden sind. Damit liegt gleichzeitig eine Validierung des Aufnahmesystems vor. In-situ Verfahren erlauben demnach ortsunabhängige

Systemvalidierungen bzw. -kalibrierungen, sofern bestimmte Anforderungen an den Bildverband bzw. das Testgebiet erfüllt sind. Dieses hat für Systemanwender den großen Vorteil, dass damit die Kamerasysteme nicht mehr für zeit- und kostenintensive Kalibrierungen zum Hersteller geschickt werden müssen und sofort nach Durchführung des Validierungs- bzw. Kalibrierflugs wieder in der Produktion eingesetzt werden können. Nur die bei dem Kalibrierflug erfassten Daten müssten dem Hersteller übermittelt werden, bzw. könnten im Idealfall gemäß Vorgaben der Hersteller von den Anwendern selbst prozessiert werden. Ein weiterer Vorteil derartiger Ansätze besteht darin, dass sie flexibel für verschiedenste Kameradesigns einsetzbar sind und die Parameter oder Genauigkeiten unter realen Einsatzbedingungen ermittelt wurden.

Die Frage ist nun, ob diese Methoden der in-situ Kalibrierung auch die definierten Kalibrierstandards der bisherigen Laborverfahren ersetzen können? Vor diesem Hintergrund sind verschiedene Aktivitäten zu sehen, die in den letzten Jahren auf nationaler und internationaler Ebene im Zusammenhang mit digitalen Luftbildkamerasystemen durchgeführt worden sind. Dabei ist zu differenzieren zwischen eher empirisch orientierten Untersuchungen und Initiativen zur Entwicklung neuer Standards und Qualitätskonzepte, die aber z.T. auf den Erfahrungen aus vorangegangenen empirischen Tests basieren.

## 2 Empirische Genauigkeitsuntersuchungen

Im Rahmen der EuroSDR (European Spatial Data Research, Nachfolgeorganisation der vormaligen OEEPE (Organisation Europeenne d'Études Photogrammetriques Experimentales), siehe auch [www.eurosd.net](http://www.eurosd.net)) wurde in 2004 ein internationales Projekt zur Kalibrierung und Validierung digitaler Luftbildkamerasysteme initiiert. Der Fokus lag dabei auf der Analyse der geometrischen Systemgenauigkeit digitaler Luftbildkameras. Letztlich wurden Testflüge der Systeme ADS40 (SH40, 1st generation), DMC und Ultracam-D in die Untersuchungen einbezogen. Da im Rahmen des Projekts keine Mittel zur Durchführung von eigenen Bildflügen zur Verfügung standen, musste auf vorliegende Befliegungen der Jahre 2003/04 in den Testgebieten Vaihingen/Enz (Deutschland) bzw. Frederikstad (Norwegen) zurückgegriffen werden, was natürlich zu unterschiedlichen Blockgeometrien führen musste. Die Weiterentwicklungen vor allem bei ADS und Ultracam standen zu der Zeit noch nicht zur Verfügung; daher ist die Übertragbarkeit der empirischen Ergebnisse auf die doch z.T. deutlich modifizierten heutigen Systeme nur eingeschränkt möglich. Dennoch konnte durch die breit angelegten Analysen nachgewiesen werden, dass die Verwendung zusätzlicher Parameter im Rahmen der Aerotriangulation für höchste Genauigkeiten offensichtlich notwendig ist. Weitere Details können CRAMER (2007) entnommen werden. Die EuroSDR-Untersuchungen sind natürlich nur ein Beispiel für derartige Genauigkeitstests; vergleichbare Untersuchungen sind zum Beispiel in HONKAVAARA et al. (2006) und JACOBSEN (2008) dargestellt. Weitere Arbeiten berücksichtigen auch die mittelformat-basierten Digitalkameras (GRENZDÖRFFER 2008) und die radiometrischen Systemeigenschaften digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme (HONKAVAARA et al. 2009). In diesem Zusammenhang ist natürlich auch die im Rahmen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) durchgeführte Evaluierung digitaler photogrammetrischer Luftbildkamerasysteme zu nennen, die in CRAMER (2009) vorgestellt wird. Erste Ergebnisse werden im Rahmen der Jahrestagung in

Jena diskutiert werden. Neben den bereits erwähnten Analysen von Geometrie und Radiometrie unter Berücksichtigung von sowohl großformatigen als auch Mittelformat-basierten Systemen werden erstmals auch umfassende Untersuchungen zur Qualität von abgeleiteten Sensorprodukten vorgenommen. Hier sind vor allem die Untersuchungen zur Evaluierung der automatischen Höhenmodellgenerierung zu nennen (HAALA & WOLFF 2009). Da sich aufgrund der unterschiedlichen Systemkonfiguration zwangsläufig auch andere Prozessketten ergeben (z.B. Zeilendaten vs. Flächenbilder), ist die Qualitätskontrolle der generierten Produkte auch von Bedeutung, da letztlich nur so die Qualität der sensorspezifischen Auswertekette überprüft werden kann. Derartige Qualitätsaussagen sind nur anhand von realen Testbefliegungen möglich, wobei natürlich die Frage der Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit auf andere Datensätze beantwortet werden muss. Dieses kann letztlich nur in Richtlinien und Standards erfolgen. Daher ist es nicht überraschend, dass die Entwicklung neuer Standards weltweit von Interesse ist.

### **3 Neue Standards und Richtlinien – Aktivitäten**

#### **3.1 USGS Quality Assurance Plan**

In den USA gibt es seit 2000 Initiativen, die sich mit der umfassenden Qualitätskontrolle digitaler Kamerasysteme beschäftigen. In 2005 wurde daraus ein Konzept zur Qualitätskontrolle für digitale Bilder entwickelt (so genannter USGS Quality Assurance Plan for Digital Imagery), das neben der eigentlichen Datenerfassung durch das Kamerasystem auch die Bereiche Ausschreibung und Endabnahme umfasst, also den Gesamtprozess von der Auftragserteilung bis hin zum prozessierten Endprodukt abdeckt (CHRISTOPHERSON 2007, siehe auch USGS 2009). Erste Systemkalibrierungen wurden zwischenzeitlich durchgeführt und Erfahrungen sind in STENSAAS & LEE (2008) gegeben. Das USGS hat schon früh Kontakt zu anderen Ländern gesucht und steht im Austausch mit ähnlichen Initiativen in Kanada (British Columbia Base Mapping and Geomatic Services (BMGS)), Australien (Intergovernmental Committee on Surveying & Mapping (ICSM)) und Europa (EuroSDR). Frühzeitige Kooperation bietet die Chance, Richtlinien möglichst länderübergreifend zu etablieren und dadurch deren Akzeptanz deutlich zu erhöhen.

#### **3.2 EuroDAC<sup>2</sup> Initiative**

Die Zertifizierungsaktivitäten im europäischen Kontext gehen auf Aktivitäten der EuroSDR zurück. In quasi direkter Fortsetzung des oben kurz vorgestellten EuroSDR Projekts Kamera Kalibrierung wurde die EuroDAC<sup>2</sup> Initiative (European Digital Airborne Camera Calibration) ins Leben gerufen. Gestützt auf die Erfahrungen aus dem eher praxisorientierten Vorläuferprojekt beschäftigt sich ein Expertenteam mit der Entwicklung von Methoden zur unabhängigen Überprüfung der Systemgenauigkeiten (CRAMER 2008). Aktuell liegt der Schwerpunkt auf der Entwicklung von Empfehlungen/Richtlinien für den Nachweis der geometrischen und radiometrischen Systemcharakteristika durch in-situ Tests und Vorgaben für das optimale Design der dafür notwendigen Testfelder (EURODAC<sup>2</sup> 2009). Eine erste Version wird im Frühjahr 2009 zur Verfügung stehen. Auch im Rahmen der USGS Aktivitäten sind Empfehlungen zur Einrichtung von Testfeldern erarbeitet worden, die unter MOE (2009) eingesehen werden können. Hier werden allerdings zunächst nur die geometrischen Aspekte abgedeckt.

Offensichtlich ist jedoch der Trend, in Zukunft quasi flächendeckend weltweit vergleichbare Testfelder für die unabhängige in-situ Kalibrierung bzw. Validierung von Kamerasystemen zur Verfügung zu stellen. Für den europäischen Raum sind hier zunächst die Testfelder Frederikstad (Norwegen), Sjökulla (Finnland), Vaihingen/Enz (Deutschland) und Pavia (Italien) zu nennen, die auch für verschiedenste photogrammetrische Untersuchungen genutzt wurden. Darüber hinaus haben die Kamerahersteller Testfelder, z.B. Romanshorn (Schweiz, Leica Geosystems), Elchingen (Deutschland, Intergraph) bzw. Gleisdorf (Österreich, Vexcel Imaging) für interne Systemkalibrierungen und Kontrolle der eigenen Systeme eingerichtet.

### 3.3 DIN 18740-4

Im September 2007 hat das DIN die Normenreihe 18740 „Photogrammetrische Produkte“ um einen Teil 4 „Anforderungen an digitale Luftbildkameras und an digitale Luftbilder“ (DIN 18740-4) erweitert. Die Norm DIN 18740-4 definiert wesentliche Anforderungen an das digitale Kamerasystem und dessen Komponenten, den Bildflug und die digitalen Bilder. Im Anhang ist ein Formblatt für die Ausschreibung von Bildflügen enthalten. Interessant sind die Vorgaben zur Kamerakalibrierung: „Die Kalibrierung der Kamera muss vom Hersteller durch ein Kalibrierungszertifikat nachgewiesen werden. Die Gültigkeit der geometrischen Kalibrierung zum Zeitpunkt des Bildfluges ist entweder durch eine Validierungsprüfung nachzuweisen, die nicht länger als ein Jahr zurückliegen darf, oder durch eine erneute Kalibrierung, die nicht länger als zwei Jahre zurückliegen darf. Die Validierungsprüfung muss so durchgeführt werden, dass über einem signalisierten Testfeld die erreichte Genauigkeit zum Überprüfungszeitpunkt mit der erreichten Lage- und Höhenmessgenauigkeit des Kamerasystems unmittelbar nach der Herstellerkalibrierung (Referenzmessung) verglichen wird.“ Interessant ist der Verweis auf die so genannte Validierungsprüfung, die eine erneute Kalibrierung ersetzen kann und über einem signalisierten Testfeld durchgeführt werden muss. Die anzuwendenden Methoden und Anforderungen an das Testfeld bleiben aber offen. Es finden sich auch keine Angaben darüber, wie die Kalibrierung an sich zu erfolgen hat. Lediglich in DIN 18716-1 Photogrammetrie und Fernerkundung – Grundbegriffe und besondere Begriffe der photographischen Aufnahme findet sich unter Kamerakalibrierung der Vermerk, dass diese „vorzugsweise unter definierten Bedingungen im Labor“ zu erfolgen hat. Auch dieses lässt einen gewissen Interpretationsspielraum zu, der aber durch die laufenden Initiativen von EuroDAC<sup>2</sup> oder USGS gefüllt werden könnte. Trotz dieser offenen Punkte muss aber festgehalten werden, dass die DIN 18740-4 zumindest für den europäischen Raum einzigartig zu sein scheint. Offensichtlich gibt es in anderen Ländern lediglich Richtlinien, die dann aber z.T. wie de facto Standards angewendet werden. In Finnland z.B. werden diese vom Finnish Geodetic Institute (FGI) herausgegeben. Die DIN Norm könnte Grundlage für weitere nationale und internationale Normungsvorhaben werden.

### 3.4 ISO/TC 211

Die ISO bietet die ideale Plattform, um auf internationaler Ebene einen Standard zu entwickeln, der dann weltweite Berücksichtigung findet. Ein neuer ISO Standard im Bereich der Kalibrierung und Validierung digitaler Kamerasysteme könnte die oben dargestellten bisherigen Aktivitäten bündeln und die Forderung nach weltweit standardisierten Kalibrier- und



Validierungstests und den zugehörigen Zertifizierungsprozessen für digitale Luftbildkameras erfüllen. Dieses ist von großem Vorteil für die Systemhersteller, da diese nicht für jedes Land ein eigenes Zertifizierungsverfahren durchlaufen müssen. Auch die Nutzer haben Vorteile durch die Festlegung von Qualitätsmerkmalen und Verfahren und der damit gewährleisteten Vergleichbarkeit. Vor diesem Hintergrund sind die aktuellen Aktivitäten des ISO/TC 211 sehr zu begrüßen. Unter der vorgesehenen Leitung von W. Kresse hat das DIN als P-Member des ISO/TC 211 im Dezember 2008 ein neues Projekt für eine technische Spezifikation für die Kalibrierung, Validierung und Zertifizierung von Fernerkundungssensoren initiiert (New Work Item Proposal ISO/TC 211 N 2607: Geographic Information – Calibration, validation and certification of remote sensing sensors and data). Mit dieser Spezifikation sollen die Verfahren zur Kalibrierung/Validierung und Zertifizierung von Sensoren, Daten und zugehörigen Prozessen inkl. der noch nicht anderweitig definierten Metadaten abgedeckt werden. Wie aus dem Titel bereits ersichtlich, sollen die Verfahren allgemeingültig für Sensoren der Fernerkundung gelten, d.h. photogrammetrische luftgestützte Sensoren finden gleichermaßen Berücksichtigung wie satellitengestützte Systeme. Weiterhin sollen standardisierte Zertifizierungen für die Kalibrierung und Validierung definiert werden, die Verfahren, Inhalt und Zuständigkeiten festlegen. In den ersten 4 Wochen nach Publikation des Entwurfs haben sich mehrere Länder geäußert. Insgesamt wird das Vorhaben positiv beurteilt, ggf. mit leichter Verschiebung der Schwerpunkte bzw. Spezifizierung des bisher recht weit gefassten Inhalts. Für den offiziellen Start des Verfahrens muss nun ein ausformulierter Entwurf vorgelegt werden. Dieser ist für Mai 2009 geplant. Die hier entwickelte technische Spezifikation muss nach 3-6 Jahren zu einem ISO Standard weiterentwickelt werden.

## **4 Zusammenfassung**

Mit diesem Beitrag wurde versucht einen Einblick in die momentanen Aktivitäten im Bereich der Kalibrierung und Zertifizierung digitaler Kamerasysteme zu geben. Aus den bereits durchgeführten oder noch aktuell laufenden zumeist praxisorientierten Untersuchungen ist offensichtlich geworden, dass neue Standards möglichst bald zur Verfügung gestellt werden müssen. Um mit den sehr schnellen Entwicklungen im Bereich der Systemneuentwicklungen und -modifizierungen Schritt halten zu können, müssen die Verfahren flexibel und auf verschiedenste Konfigurationen anwendbar sein. Im Bereich der Kalibrierung/Validierung geometrischer Luftbildkameras scheint aus diesem Grund alles schwerpunktmäßig auf in-situ Verfahren in definierten Testfeldumgebungen hinauszulaufen. Die bereits geleisteten Vorarbeiten in einzelnen nationalen und internationalen Organisationen bieten die Möglichkeit, die Expertise in einem internationalen Standard zusammenführen zu können.

## **5 Literaturverzeichnis**

CRAMER, M., 2005: Digital airborne cameras - status and future, in Proceedings ISPRS workshop "High resolution earth imaging for geospatial information", University of Hannover, Hannover/Germany, May 17-20, 2005, digitally published on CD, 8 pages.

- CRAMER, M., 2007: The EuroSDR performance test for digital aerial camera systems, in Fritsch (ed.): Photogrammetric Week 07, Wichmann Verlag, Karlsruhe, Seiten 89-106, <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo07/120Cramer.pdf>, letzter Zugriff 22. Januar 2009.
- CRAMER, M., 2008: The EUROS DR Approach on Digital Airborne Camera Calibration and Certification. IAPRS, Vol. XXXVII, Part B4, Com. 4, ISPRS Congress 2008, Beijing, China., Seiten 1753ff.
- CRAMER, M., 2009: Das DGPf-Projekt zur Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme, dieser Tagungsband 18 / 2009, Jahrestagung DGPf Jena.
- CHRISTOPHERSON, J., 2007: The USGS Quality Assurance Plan for Digital Aerial Imagery, GIM International, September 2007, Volume 21, Issue 9, digital verfügbar unter [http://www.gim-international.com/issues/articles/id980-USGS\\_QA\\_Plan.html](http://www.gim-international.com/issues/articles/id980-USGS_QA_Plan.html), letzter Zugriff 22. Januar 2009.
- EURODAC<sup>2</sup> 2009: EuroSDR project: Digital Airborne Camera Certification (EuroDAC<sup>2</sup>), allgemeine Projektinformationen, digital verfügbar unter <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/eurosdrr/index.html>, letzter Zugriff 22. Januar 2009.
- GRENDZÖRFFER, G., 2008: Medium Format Digital Cameras – an EuroSDR project, IAPRS Volume XXXVII, Part B1, Com I, ISPRS Congress 2008, Beijing, China., Seiten 1043-1050.
- HAALA, N. & WOLFF, K., 2009: Digitale photogrammetrische Luftbildkamerasysteme – Evaluation der automatischen Generierung von Höhenmodellen, dieser Tagungsband 18 / 2009, Jahrestagung DGPf Jena.
- HONKAVAARA, E.; AHOKAS, E.; HYYPÄ, J.; JAAKKOLA, J.; KARTINEN, H.; KUITTINEN, R.; MARKELIN, L. & NURMINEN, K., 2006: Geometric test field calibration of digital photogrammetric sensors, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Special Issue on Digital Photogrammetric Cameras, 60(6):387-399.
- HONKAVAARA, E.; MARKELIN, L. & ARBIOL, R., 2009: EuroSDR project: Radiometric Aspects of Digital Photogrammetric Images, digital verfügbar unter <http://www.fgi.fi/EuroSDR/>, letzter Zugriff 22. Januar 2009.
- JACOBSEN, K., 2008: Geometrisches Potential und Informationsgehalt von großformatigen digitalen Luftbildkameras, PFG 2008, Heft 5, pp 325-336.
- LEMMENS, 2008: Digital Aerial Cameras: System Configurations and Sensor Architectures, GIM International, April 2008, Volume 22, Issue 4, digital verfügbar unter [http://www.gim-international.com/issues/articles/id1084-Digital\\_Aerial\\_Cameras.html](http://www.gim-international.com/issues/articles/id1084-Digital_Aerial_Cameras.html), letzter Zugriff 22. Januar 2009.
- MOE, D., 2009: Digital Imagery Calibration Range Requirements (draft), digital verfügbar unter <http://calval.cr.usgs.gov/documents/InSituCalibrationRangeRequirementsV02.doc>, letzter Zugriff 22. Januar 2009.
- STENSAAS, G. & LEE, G., 2008: Driving Toward A Worldwide Acceptance Procedure for Digital Airborne Sensors IAPRS Volume XXXVII, Part B1, Com I, ISPRS Congress 2008, Beijing, China, Seiten 561ff., digital verfügbar unter, letzter Zugriff 22. Januar 2009.
- TEMPELMANN, U. & HINSKEN, L., 2007: Hardware improvements of the ADS40 sensor heads SH51/52 and how they allow a better camera model for self calibration, in Grün/Kahmen (eds.): Proceedings on Optical 3-D Measurement Techniques VIII, Zürich, Switzerland, Seiten 187-193.

USGS, 2009: Digital Aerial Imaging Quality Assurance, allgemeine Projektinformationen, digital verfügbar unter [http://calval.cr.usgs.gov/digital\\_aerial\\_imaging\\_quality\\_assurance.php](http://calval.cr.usgs.gov/digital_aerial_imaging_quality_assurance.php), letzter Zugriff 22. Januar 2009.

## 3D-Erfassung von Freiformflächen aus Bildsequenzen unter Berücksichtigung von Störobjekten

FOLKMAR BETHMANN, BENJAMIN HERD, THOMAS LUHMANN & JULIA OHM<sup>1</sup>

*Der vorliegende Beitrag beschreibt ein Verfahren zur photogrammetrischen Auswertung von Bildsequenzen, das die dreidimensionale Rekonstruktion von Oberflächendeformationen in dynamischen Anwendungen ermöglicht. Das Verfahren beinhaltet Vorverarbeitungsschritte (Resampling, Wallis-Filterung), bildraumbasierte photogrammetrische Zuordnungsverfahren mit geometrischen Bedingungen (Kreuzkorrelation, Least-Squares Matching) sowie Strategien zum Umgang mit Einflüssen, die den Zuordnungsprozess stören. Störungen treten in praktischen Anwendungen wie z.B. dem Fahrzeugsicherheitsversuch unvermeidlich auf und der Umgang mit ihnen stellt eine besondere Herausforderung dar. Die im Folgenden vorgestellte Strategie zur Störobjektbehandlung nutzt Bildmasken, in denen Zusatzinformationen zur Steuerung des Matchings abgelegt werden. Für bekannte Störobjekte wird ein objekt-raumbasierter Verfolgungsalgorithmus vorgestellt.*

*Das Verfahren wurde in verschiedenen praktischen Versuchen getestet, die Testergebnisse werden dargestellt und erläutert.*

### 1 Einleitung

Die flächenhafte 3D-Erfassung von nahezu beliebig geformten Objektoberflächen gehört zu den Standardaufgaben der optischen 3D-Messtechnik. Es bieten sich je nach Messvolumen, Oberflächenbeschaffenheit und Genauigkeitsansprüchen verschiedene Messtechniken an, wie z.B. Streifenprojektion, Lichtschnittverfahren oder auch Photogrammetrie. Aktive Messtechniken wie die Streifenprojektion oder das Lichtschnittverfahren haben den Nachteil gegenüber den passiven photogrammetrischen Messtechniken, dass sich die Dauer der Oberflächenaufnahme zu einer Epoche bis zu einigen Minuten ausdehnen kann. In diesem Zeitraum wird eine konstante bzw. eine sich minimal ändernde Oberfläche vorausgesetzt. Während die Aufnahmedauer zu einer Epoche bei photogrammetrischen Verfahren zu vernachlässigen ist, sind deren Einschränkungen vor allem in der Aufnahmefrequenz der Kamera und der damit verbundenen Umgebungsbeleuchtung zu sehen.

Da in vielen industriellen messtechnischen Aufgabenstellungen die Möglichkeit zum Einsatz von photogrammetrischen Messtechniken leicht zu verwirklichen ist, wird im Folgenden eine Auswertestrategie zur 3D-Erfassung von Freiformflächen aus Bildsequenzen vorgestellt (Kapitel 2). Kapitel 3 beschreibt die Erweiterung der Auswertestrategie unter Berücksichtigung von Störobjekten und die damit verbundene Erweiterung der Matchingstrategie. Die Steuerung und Nutzung der vorgestellten Auswertestrategien wird durch das Softwarepaket PISA (Photogrammetric Image Sequence Analysis) umgesetzt. Beispielhaft sind in Kapitel 4 die Ergebnisse dieser Auswertestrategie an zwei Laborversuche dargestellt.

<sup>1</sup> Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik (IAPG), Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven, Ofener Str. 16-19, D-26121 Oldenburg, E-Mail: folkmar.bethmann@fh-ooow.de, benjamin.herd@fh-ooow.de, luhmann@fh-ooow.de, julia.ohm@fh-ooow.de

## 2 Freiformerfassung aus Bildsequenzen

Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitsschritte des Verfahrens zur flächenhaften dynamischen Erfassung von Oberflächendeformation kurz dargestellt und erläutert. Einleitend seien in diesem Zusammenhang einige verfahrensbedingte Rahmenbedingungen genannt.

Der Algorithmus verarbeitet Bildsequenzen zweier Kameras, die Auswertung erfolgt also in Stereobildern. Eine synchrone Bilderfassung ist zu gewährleisten, da sich Asynchronitäten bei der Aufnahme bewegter Objekte später direkt als Fehler bei der Berechnung von 3D-Objektkoordinaten auswirken (RAGUSE 2007).

Zur Erzeugung synchroner Bildsequenzen für Stereobildauswertungen bietet sich der Einsatz von nur einer Kamera in Kombination mit einem Stereostrahlteiler an (LUHMANN et al. 2004).

Die Orientierungsdaten (innere und äußere Orientierung) müssen für jedes Bild vorab ermittelt und zur Verfügung gestellt werden.

Da mit passiven photogrammetrischen Zuordnungsverfahren gearbeitet wird, muss die Objektoberfläche mit einer möglichst stochastischen Textur versehen werden. Die Merkmalsgröße der Textur Elemente muss an die Aufnahme Konfiguration und die Abbildungseigenschaften der Kameras angepasst werden.

### 2.1 Vorverarbeitung: Stereonormalbilder und Wallis-Filter

Die Vorverarbeitung beinhaltet Verfahrensschritte, die vom Nutzer angestoßen werden und ohne weitere Interaktion durchlaufen werden. Rechenzeitintensive Prozesse können so von der eigentlichen Oberflächenerfassung entkoppelt werden und z.B. über Nacht durchgeführt werden.

#### 2.1.1 Stereonormalbilder

Der wichtigste Vorverarbeitungsschritt im vorgestellten Verfahren ist die geometrische Umbildung der Originalbilder in Stereonormalbilder. Stereonormalbilder sind senkrecht zur Basis ausgerichtete Bilder, deren Kamerakonstanten identisch sind und deren Hauptpunktlage und Verzeichnungswerte gleich Null sind. Mit der Berechnung von Stereonormalbildern geht eine starke Vereinfachung der Epipolarometrie einher. Die Kernlinien liegen parallel zu den  $x'$ - und  $x''$ -Richtungen der Bildkoordinatensysteme, so dass die Pixel einer Bildzeile direkt einer Kernlinie zugeordnet werden können. Es lassen sich somit leicht geometrische Bedingungen für das spätere Matching formulieren, die für die Einschränkung des Suchraumes bei der Suche nach homologen Bildpunkten nötig sind, um die Berechnungsdauer zu verringern und die Zuverlässigkeit des Verfahrens zu erhöhen. Außerdem ist es von Vorteil, dass im weiteren Verfahrensablauf auf Verzeichnungskorrekturen verzichtet werden kann (z.B. PIECHEL 1991, LUHMANN 2003, LUHMANN et al. 2006).

#### 2.1.2 Wallis-Filter

Im Zusammenhang mit der Nutzung von bildraumbasierten photogrammetrischen Zuordnungsverfahren bietet es sich an, die Bilder einer Filterung mit einem Wallis-Filter zu unterziehen (REMONDINO 2006). Der Wallis-Filter sorgt für eine Kontraststeigerung in Bildbereichen mit schwachem Kontrast bei gleichzeitiger Erhaltung bzw. Verminderung des Kontrastes in Bildbereichen mit gutem Kontrast. Insgesamt wird das Kontrast- und Helligkeitsniveau des

gesamten Bildes einheitlicher. Dies führt zur Abmilderung des Einflusses von Reflektionen und Überstrahlungen sowie Schattenwürfen. Durch Anwendung des Wallis-Filters erhöhen sich Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Zuordnung im Matchingprozess nachweislich.

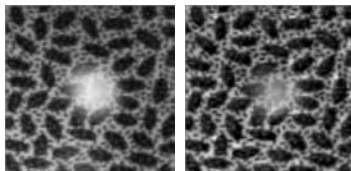


Abb. 1: Originalbild (links) und Bild nach Wallis-Filterung (rechts)

Ausführliche Informationen zur Nutzung von Wallis-Filtern im Zusammenhang mit photogrammetrischen Matchingverfahren sind in (BALTSAVIAS 1991) und im Zusammenhang mit Interestoperatoren in (FRASER et al. 2008) zu finden.

## 2.2 Korrespondenzanalyse: Kreuzkorrelation und Least-Squares Matching

Das vorgestellte Verfahren verwendet bildraumbasierte Zuordnungsmethoden zur Lösung des Korrespondenzproblems. Der Algorithmus arbeitet dabei flächenbasiert („area based“), d.h. es werden flächenhafte Bildausschnitte zur Berechnung von Ähnlichkeitsmaßen herangezogen. Diese Vorgehensweise unterscheidet sich grundsätzlich von merkmalsbasierten Verfahren, die den Fokus auf die Suche markanter Merkmale in den Bildern und deren anschließende gegenseitige Zuordnung richten.

In einem ersten Schritt wird die Methode der normierten Kreuzkorrelation verwendet (z.B. PIECHEL 1991), um homologe Punkte in den Stereopartnern ausfindig zu machen. Die Festlegung von Referenz- und Suchbereichen in den Bildern geschieht über 3D-Näherungskordinaten am Objekt, die über die Abbildungsgleichungen zurück in beide Bilder gerechnet werden. Eine weitere Einschränkung des Suchbereiches erfolgt durch Berücksichtigung der Epipolarbedingung, indem die Verschiebung des Referenzfensters im Suchausschnitt ausschließlich entlang einer Bildzeile – die im Stereonormalfall der Kernlinie entspricht – erfolgt. Zur Erhöhung der Zuverlässigkeit wird die Korrelation zweimal durchgeführt, einmal vom ersten ins zweite Bild und dann, ausgehend von der im zweiten Bild gefundenen Position zurück ins erste Bild. Treten bei der zweiten Korrelation zu große Differenzen zum ursprünglichen Startpunkt auf, wird das Korrelationsergebnis verworfen.

Im Anschluss an die Korrelation kann ein Least-Squares Matching (LSM) durchgeführt werden, um das Zuordnungsergebnis zu verfeinern. Das LSM nimmt im Rahmen einer Ausgleichung eine radiometrische und geometrische Anpassung der Bildausschnitte vor (GRÜN 1985). Je nachdem, welche Transformationsvorschrift für die Geometrieanpassung im funktionalen Modell der Ausgleichung zugrunde gelegt wird, lässt sich der Einfluss bestimmter negativer Effekte abmildern. So können perspektivische Verzerrungen zwischen den Bildausschnitten – hervorgerufen z.B. durch stark konvergente Aufnahmerichtungen oder starke Neigungen der Objektoberfläche in Bezug zu den Aufnahmerichtungen – insbesondere dann gut modelliert werden, wenn der im LSM im Allgemeinen zugrunde gelegte Ansatz der Affintransformation auf

den Ansatz der Projektivtransformation erweitert wird. Die Anzahl der zu schätzenden unbekannten Geometrieparameter erhöht sich dann von sechs auf acht (LUHMANN et al. 2008a). Eine Steigerung der Zuordnungsgenauigkeit bei Verwendung des auf die Projektivtransformation erweiterten Ansatzes für projektiv zueinander verzerrte Bildausschnitte konnte unter Verwendung synthetisch erzeugter Testdaten nachgewiesen werden.

Das Ergebnis der Korrespondenzanalyse sind homologe Bildpunkte, aus denen 3D-Koordinaten auf der Objektoberfläche durch räumlichen Vorwärtsschnitt berechnet werden können.

### **3 Behandlung von Störobjekten**

Die bekannten Probleme der optischen Messtechnik in Bezug auf Verdeckung und Abschattung der zu messenden Oberfläche sind geeignet in dem oben beschriebenen Auswerteverfahren zu berücksichtigen. Diese beiden Hauptprobleme sind nicht nur in dem statischen sondern auch in dem dynamischen Fall der photogrammetrischen Bildauswertung vorhanden. Erschwerend kommt in dem dynamischen Fall hinzu, dass die Orte der Verdeckung der Oberfläche innerhalb einer Bildsequenz nicht identisch sind. Es wird daher eine Lösung angestrebt, die es ermöglicht, im Auswerteprozess problembehaftete Stellen im Bildmaterial zu erkennen und entsprechend zu berücksichtigen.

#### **3.1 Störobjekte und Problemstellen**

Problemstellen im auszuwertenden Datenmaterial können durch folgende Ursachen bei der Datenerfassung entstehen.

1. Aufnahmekonfiguration
2. Aufzunehmende Oberfläche und deren Umgebung
3. Bewegung einzelner Objekte im Kamerasichtfeld
4. Erscheinen von neuen Objekten im Kamerasichtfeld

Diese Problemstellen beeinflussen den Oberflächenreproduktionsprozess nachhaltig. Die Verarbeitung solcher Stellen wird durch eine Maskensteuerung in PISA geregelt. Die eingesetzten Bildmasken sind Dreikanalbilder mit jeweils 8-Bit Farbtiefe, deren Pixelgröße und Anordnung denen der erzeugten Stereonormalbilder entsprechen. Die Maskensteuerung bietet den Vorteil, dass darin nicht nur Informationen von Störflächen der einzelnen Bilder enthalten sein können, sondern auch weitere Informationen zu den jeweiligen Pixeln des zugehörigen Auswertebildes.

Ausgehend von der Fragestellung der beteiligten Projektpartner, die den Umgang mit befestigten aber auch umher fliegenden sowohl bekannter als auch unbekannter Störobjekte im Sichtfeld der Aufnahmekameras beinhaltet, werden diese Störobjekte näher untersucht.

Klasse	Bekannte Form	Bekannte Lage	Teilweise bekannte Lage
1	✓	✓	✓
2	✓	-	✓
3	✓	-	-
4	-	✓	✓
5	-	-	✓
6	-	-	-

Tab. 1: Klassifizierung von Störobjekten

Die in der Tabelle (Tab. 1) aufgeführten Klassen 1 bis 6 beschreiben die zur jeweiligen auszuwertenden Epoche vorhandenen Vorinformationen der Störobjekte im Objektraum. Dabei sollte ein Störobjekt nicht ausschließlich als Gegenstand interpretiert werden, da Störobjekte z.B. auch als Problemstellen in der Form einer Reflexion auf der zu messenden Oberfläche interpretiert werden könnten.

### 3.2 Das Störobjekt als Gegenstand

Ist für ein Störobjekt eine formbeschreibende Punktwolke oder ein CAD-Model des Störobjektes vorhanden, so ist eine Dreiecksvermaschung dieser Daten möglich. Durch die Definition von Passpunkten im Koordinatensystem der Vermaschung, die ein Bestimmen der späteren Lage des Störobjektes im Objektraum ermöglicht, gelingt es, die Abbildung der jeweiligen Störobjekte in die Bildmasken zu berechnen. Verfolgt man diese Passpunkte durch die Bildsequenzen, ist das Erstellen von Bildmasken automatisiert möglich. Derzeit müssen die Daten der Passpunktkoordinaten von einer externen Software geliefert werden, um eine automatische Maskengenerierung innerhalb der Softwareumgebung PISA zu ermöglichen.

### 3.3 Verfolgen der Störobjekte im Raum

Im Wesentlichen bieten sich drei Möglichkeiten an Störobjekte zu verfolgen. Diese sind das Verfolgen der Störobjekte im Objektraum, das Verfolgen im Bildraum sowie die Kombination beider Techniken. Eine entscheidende Voraussetzung, Störobjekte im Raum zu verfolgen, ist die Prädiktion des Ortes (Zustandes), an dem sich das Störobjekt zum Zeitpunkt  $t+1$  aufhält. Dies gelingt über mathematische Filteransätze wie z.B. das Kalman- oder Partikel-Filter (BRAMMER & SIFFLING 1985 bzw. BLAKE & ISARD 1998). Entscheidend sind die Beobachtungen des Systemzustandes zum Zeitpunkt  $t$ , die es ermöglichen, die Aussage des Systemzustandes zum Zeitpunkt  $t+1$  zu schätzen. Im Fall der Störobjekte können diese Beobachtungen z.B. einzelne Punkte, Umrisskanten des Störobjektes, Farbmuster und vieler mehr sein.

Derzeit ist eine objektraumbasierte Verfolgung im Test, die das Kalmanfilter verwendet. Unter der Annahme, dass das zu erfassende Störobjekt ein Festkörper von geometrischer Stabilität ist, bietet das objektraumbasierte Verfahren den Vorteil diese verformungsinvariante Eigenschaft zu nutzen. Werden Passpunktkoordinaten des Störobjektes im Objektraum durch eine Bildmessung mit anschließendem Vorwärtsschnitt in der ersten und zweiten Epoche der Bildsequenzen bestimmt, so ergeben sich Näherungswerte zur Initialisierung des Filters. Ist eine zeitsynchrone, mit einer der Bewegung des Störobjektes angepassten Frequenz aufgenommene Bildsequenz



vorhanden, kann seine Raumtrajektorie mittels der Passpunkte beschrieben werden. Die schematische Vorgehensweise einer automatisierten Bildmaskenerzeugung wird in (Abb. 2) dargestellt.

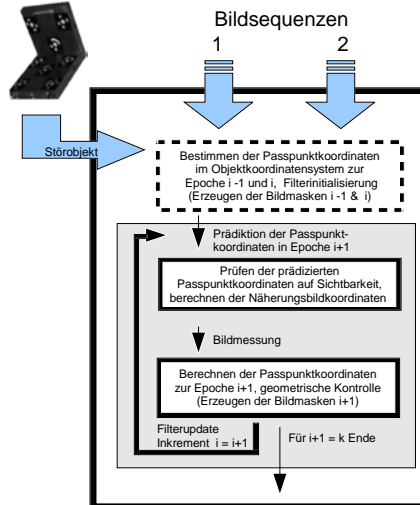


Abb. 2: Objektverfolgung mittels Kalmanfilter

Das Kalmanfilter bedient sich in diesem Ansatz der gleichmäßig beschleunigten Bewegungsgleichung als Systemdifferentialgleichung.

$$s(t) = \frac{1}{2} at^2 + v_0 t + s_0 \quad \text{eq. 1}$$

mit

- $s_0$  : Anfangsweg
- $v_0$  : Anfangsgeschwindigkeit
- $a$  : Beschleunigung
- $t$  : Zeit

Die Passpunkttrajektorien können in drei Komponenten zu je einer 1D-Trajektorie in Achsrichtung zerlegt werden, die die Bewegung des Punktes im Raum beschreiben. Werden eventuelle Unstimmigkeiten im geometrischen Modell der Passpunkte korrigiert bzw. vorab ein geometrisch topologischer Zusammenhang der Punktwolke als Bedingung formuliert, so kann das Stör Objekt direkt in die Bildmasken gezeichnet werden. Nachteile des hier beschriebenen Ansatzes sind zum einen das Anpassen der Aufnahme Frequenz gegenüber der Bewegung des Stör Objektes. Zum anderen müssen am Stör Objekt befestigte Passpunkte für die Aufnahmekameras sichtbar sein. Als vorteilhaft stellt sich hingegen die Möglichkeit der Verfolgung von Stör Objekten heraus, die sich vor einem sich verändernden Hintergrund

bewegen. Weiterhin gelingt es Bewegungen der Kameras untereinander sowie gegenüber dem aufzunehmenden Objektraum zuzulassen.

### 3.4 Matchingstrategie

Die Steuerung der Ausbreitungsrichtung des Algorithmus erfolgt über feste Stützstellen in einem 2½D Raster, das in der XY-Ebene des Objektkoordinatensystems definiert werden muss. Der zu messende Objektbereich wird durch ein Rechteckpolygon eingegrenzt, das durch die X- und Y-Koordinatenkomponenten zweier gemessener 3D-Koordinaten auf der Objektoberfläche festgelegt wird. Rasterweiten ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ) sind anzugeben (s. Abb. 3). Die zur Umringfestlegung gemessenen Punkte sowie eine beliebige Anzahl weiterer 3D-Punkte auf der Objektoberfläche können als Näherungswerte und Startpunkte für das Matching verwendet werden. Der erste Punkt dieser Liste ist Einstiegspunkt für das Matching. Nach erfolgreicher Zuordnung (s. Abschnitt 2.2) wird über den räumlichen Vorwärtsschnitt ein 3D-Punkt berechnet und abgespeichert. Die Z-Komponente des berechneten Punktes wird als Näherungswert für den nächsten zu messenden Rasterpunkt verwendet. Dieser wird nach folgendem Schema lokalisiert:

1. Erhöhe wenn möglich um  $\Delta X$ , sonst
2. verringere wenn möglich um  $\Delta X$ , sonst
3. erhöhe wenn möglich um  $\Delta Y$ , sonst
4. verringere wenn möglich um  $\Delta Y$ , sonst
5. gehe wenn möglich zum letzten Punkt mit möglichen Nachbarn, sonst
6. gehe zum nächsten Startpunkt

Ein Rasterpunkt, der als nächster Punkt in Frage kommt, erfüllt folgende Kriterien:

- Punkt liegt innerhalb des definierten Rechteckpolygons
- Punkt ist bisher nicht erfolgreich gemessen worden
- Punkt ist von aktuellem Punkt aus noch nicht angesteuert worden
- Abfrage der Bildmasken positiv

Diese Vorgehensweise bewirkt, dass kritische Oberflächenbereiche, an denen eine Zuordnung nicht möglich ist, ausgespart und „umwandert“ werden. Zusätzlich ist die Weitergabe eines guten Näherungswertes durch die konsequente Einhaltung von Punktnachbarschaften gewährleistet.

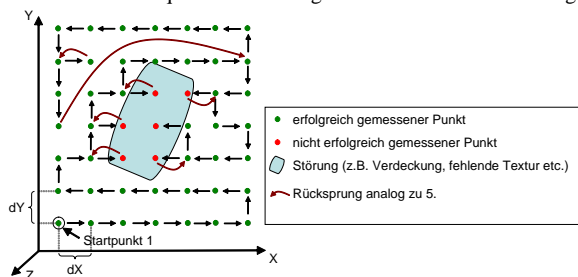


Abb. 3: Verlauf eines Matchings mit Störbereich

## 4 Ergebnisse

Der vorgestellte Algorithmus wurde anhand zweier verschiedener Testreihen validiert. Die Testreihen unterscheiden sich jeweils in der Form des Störobjektes und in der Aufnahmekonfiguration. Für die Berücksichtigung der Störobjekte wird eine stl-Datei des jeweiligen Störobjekts benötigt. Zudem muss das Störobjekt mit Messmarken versehen werden, damit später die Position in den Messbildern ermittelt werden kann. Dazu müssen mindestens drei Marken in jeder Epoche erkennbar sein. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, kann eine dreidimensionale Erfassung der zu ermittelnden Oberfläche erfolgen. Für alle Versuche wurden zwei Hochgeschwindigkeitskameras der Reihe SpeedCam MiniVis von Weinberger mit einer Bildauflösung von 1280 x 1024 Pixel und einer Pixelgröße von 12  $\mu\text{m}$  zur Bildaufnahme verwendet. Ihre Aufnahmefrequenz beträgt in Vollauflösung 500 Hz. Durch ein externes Triggersignal besteht die Möglichkeit zur synchronen Bildaufnahme. Die Kameras wurden mit 10 mm-Objektiven der Firma Schneider ausgestattet. Zur Ausleuchtung der Szene werden zwei Standstrahler mit jeweils 500 Watt verwendet.

### 4.1 Versuch A

In Versuch A wurde ein Störobjekt mit einer einfachen Geometrie verwendet. Es besteht aus zwei ebenen Platten, die annähernd in einem 90° Winkel angeordnet sind (Abb. 4). Die Referenzdaten für dieses Objekt lassen sich einfach herstellen und sind für einen ersten Versuch geeignet. Das Objekt bewegt sich vor der zu erfassenden Oberfläche während der Aufnahme der Bildsequenz. Für die Oberfläche wurde in diesem Versuch ein vorhandener 3D-Flächenprüfkörper verwendet (beschrieben in LUHMANN et al. 2008a), welcher sich während der Aufnahme nicht bewegt hat. Die Kamerakonfiguration ist bei diesem Versuch so gewählt, dass eine gute Strahlenschnittgeometrie erreicht wird.

Über die Bestimmung von Objektkoordinaten von mindestens drei Passpunkten auf dem Störobjekt für jede Epoche kann die bekannte Geometrie des Störobjekts in die Bilder transformiert und somit in die Bildmasken eingezeichnet werden (Abb. 4). Die grün dargestellten Flächen in den Bildmasken repräsentieren die Fläche des Störobjektes im Bild.

Bei der anschließenden Auswertung wurde für die Zuordnung ein rechteckiger Umring festgelegt. Bei der Erfassung der dreidimensionalen Oberfläche wird der Bereich des Störobjektes erkannt und es erfolgt in dem ausmaskierten Bereich keine Zuordnung homologer Punkte (Abb. 4).

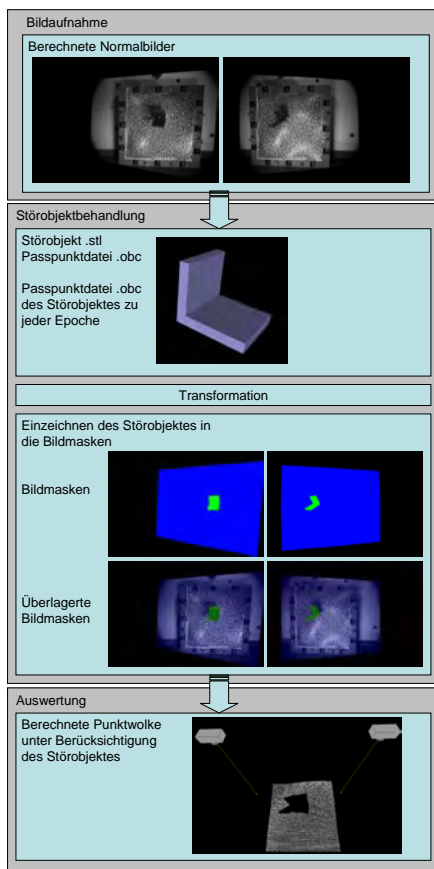


Abb. 4 : Ablauf Störobjektbehandlung am Beispiel des Versuchs A

Durch die Verwendung von beliebig vielen Startpunkten mit bekannten Näherungswerten ist eine Zuordnung im gesamten Bereich der Oberfläche gewährleistet. Wird der Wert des vorherigen erfolgreich gemessenen Punktes als Näherungswert verwendet, kann es aufgrund einer großflächigen Verdeckung zu einer schlechten Zuordnung kommen.

Problematisch bei der Zuordnung sind derzeit kleine und unbekannte Störobjekte. In Versuch A führt der Faden, an dem das Störobjekt befestigt wurde, zu fehlerhaften Zuordnungen (Abb. 5). Da sich aufgrund des Fadens die Ähnlichkeit der Abbildungen in dem Referenzfenster zum Suchfenster verringert, verschlechtert sich das Ähnlichkeitsmaß.

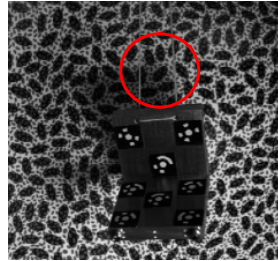
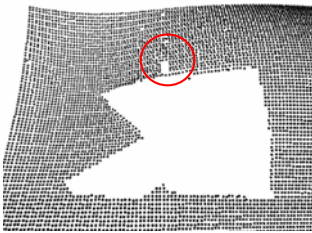


Abb.5: Problembereich Zuordnung

## 4.2 Versuch B

Versuch B wurde einem praktischen Beispiel in der Automobilindustrie nachempfunden. Im Rahmen der derzeitigen Fahrzeugentwicklung spielt die Fußraumintrusion des Fahrzeuges während eines Crashversuches eine wichtige Rolle bei der Bewertung der Insassensicherheit. Während eines realen Crashtests kann der Aufprall zu Bewegungen in der Pedalerie führen. Die Pedalerie sollte bei der Erfassung der Oberfläche in jeder Epoche unberücksichtigt bleiben. Für den Versuch B wurde eine Bildsequenz eines Fußraummodells mit einem bewegten Pedal aufgezeichnet. Die komplexe Geometrie der Pedale ist durch eine vorher erstellte stl-Datei bekannt (Abb. 6).



Abb. 5: Störobjekt Versuch B

Durch Messmarken auf dem Pedal kann ihre Position in jeder Epoche bestimmt und ihre Geometrie in die Bildmasken transformiert werden. Abb. 7 zeigt für den Versuch B die aufgenommenen Bilder einer Epoche überlagert mit den zugehörigen Bildmasken. Das Pedal ist durch grüne Flächen in der Bildmaske als Störobjekt gekennzeichnet.

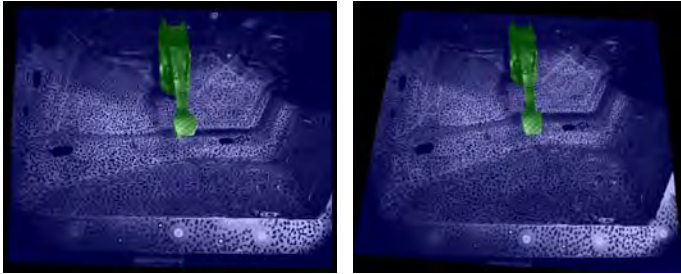


Abb. 6: Normalbilder überlagert mit Bildmasken – Versuch B

Beim anschließenden Matching bleibt das Pedal in der Auswertung unberücksichtigt. In der berechneten Punktwolke ist die Ausgrenzung des Störobjekts deutlich zu erkennen (Abb. 8). Es treten vereinzelt Fehlzuordnungen auf, die durch die komplexe Oberflächengeometrie des Fußraums bedingt sind. Aufgrund von starken Neigungen in der Oberfläche verringert sich die Ähnlichkeit in den Abbildungen und das Ähnlichkeitsmaß verschlechtert sich. Zudem treten zum Teil starke Reflexionen auf, die mittels Wallis-Filter minimiert werden.

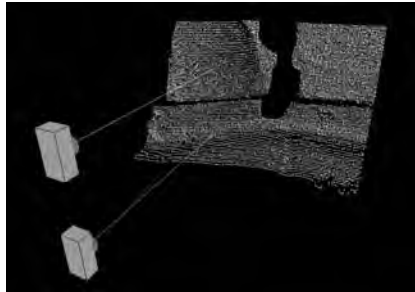


Abb. 7: Berechnete Punktwolke – Versuch B

#### 4.3 Genauigkeit und Rechenzeit

Die Genauigkeit des Verfahrens wurde u.a. im Laborversuch für eine statische Fußraumauswertung unter Verwendung der in Abschnitt 4 beschriebenen Kameras ermittelt. Die mittlere quadratische Abweichung aller Objektpunkte zur Soll-Geometrie beträgt 0.75mm (LUHMANN et al. 2008b).

Die Untersuchung der Rechenzeit wurde unter folgenden Bedingungen vorgenommen:

- PC: 2,4 GHz Intel Core 2 Prozessor, 8 GB RAM
- Betriebssystem / PISA Version: Windows XP Pro x64 Edition / PISA x64 Version
- Datensatz: 184.000 Objektpunkte (10 Epochen á 18.400 Punkte)
- Matchingeinstellungen: Least-Squares Matching, doppelte Kreuzkorrelation

Die Berechnungszeit für diesen Datensatz beträgt 5.9 Minuten.

## 5 Ausblick

Die hier vorgestellte Auswertestrategie der Bildsequenzen zur 3D-Oberflächenerfassung bietet die Möglichkeit, Oberflächenverformungen in hochdynamischen Prozessen zu dokumentieren und weiteren Bearbeitungsschritten zuzuführen. Zukünftige Arbeiten werden im Bereich der Störobjektbehandlung liegen. Ziele sind hier das Berücksichtigen unbekannter Störobjekte (Kabel, Fäden, Splitter) und das Verhalten der sich deformierenden Oberfläche im Bereich der durch die Störobjekte kurzzeitig hervorgerufenen Verdeckung.

## Literaturverzeichnis

- BALTSAVIAS, E. P., 1991: Multiphoto geometrically constrained matching. PhD Dissertation. Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zürich, Mitteilungen No. 49.
- BLAKE, A. & ISARD M., 1998: Active Countours, Springer Berlin
- BRAMMER, K. & SIFFLING, G., 1985: determinist. Beobachtung u. stochastische Filterung 2. verb. Auflage, Oldenbourg
- GRUEN, A., 1985: Adaptive least squares correlation – a powerful image matching technique. South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography, 14(3): 175-187.
- LUHMANN, T., 2003: Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden und Anwendungen. 2. Auflage, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- LUHMANN, T. & RAGUSE, K., 2004: Synchronous 3-D High-Speed Camera with Stereo-Beam Splitting. SENSOR 2005, 12th International Conference, AMA Service: 443-448.
- LUHMANN, T.; WENDT, A. & GODDING, R., 2006: Dynamische Oberflächenkonstruktion in Stereobildsequenzen von Hochgeschwindigkeitskameras. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, Jahrgang 2006, Heft 5, S. 427-438.
- LUHMANN, T.; BETHMANN, F.; HERD, B. & OHM, J. 2008a: Photogrammetrische Freiformerfassung aus Bildsequenzen. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008: 43-52.
- LUHMANN, T.; BETHMANN, F.; HERD, B. & OHM, J. 2008b: Comparison and Verification of optical 3-D Surface Measurement Systems. ISPRS Proceedings, Vol. XXXVII, Part B5, Commission V, WG V/I: 51-56.
- PIEHEL, J., 1991: Stereobild-Korrelation. In Bähr/Vögtle (ed.): "Digitale Bildverarbeitung – Anwendung in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung". Wichmann Verlag, Heidelberg: 96-132.
- RAGUSE, K., 2007: Dreidimensionale photogrammetrische Auswertung asynchron aufgenommener Bildsequenzen mittels Punktverfolgungsverfahren. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Dissertationen, Heft Nr. 602, München.
- REMONDINO, F., 2006: Image-Based Modeling for Object and Human Reconstruction. Doctoral Thesis ETH No. 16562, Zurich.

# Classification of Elevation Data based on analytical versus trained Feature Values to determine Object Boundaries

HERMANN GROSS<sup>1</sup>, BORIS JUTZI<sup>2</sup>, ULRICH THOENNESSEN<sup>3</sup>

*Kurzfassung: Dreidimensionale Gebäudemodelle werden zunehmend wichtiger, sie werden sowohl für die Städteplanung, für die Navigation als auch zur Visualisierung touristischer oder historischer Objekte eingesetzt. Durch 3D-Modelle können komplexe städtische Szenen beschrieben werden. Dadurch werden unterschiedliche Anwendungen ermöglicht, beispielsweise die Simulation eines Stadtrundgangs, den Probegang eines geplanten Weges, den Überflug über ein Terrain auf verschiedenen Flugpfaden und die Betrachtung der Szene von unterschiedlichen Standorten aus.*

*Die automatische Generierung von 3D Modellen auf der Basis von Höhendaten stellt eine aktuelle wissenschaftliche Herausforderung dar. Besonders von Interesse ist die Extraktion der Berandungen von Objekten. In diesem Artikel wird eine automatisches Verfahren präsentiert, mit dem aus den 3D-Punktwolken der Laserhöhendaten Linienstücke zur Beschreibung der Objekumrandungen generiert werden. Für jeden 3D-Punkt werden zusätzliche Merkmale durch Berücksichtigung der Nachbarschaftsumgebung berechnet. Durch geeignete Normierung wird hierbei Invarianz gegenüber Translation, Skalierung und Rotation der Objekte erreicht. Insbesondere die Zuverlässigkeit der ermittelten Merkmale in Abhängigkeit von der Punktdichte wird untersucht und bewertet. Für die Klassifikation werden die neuen Merkmale verglichen einerseits mit analytisch berechneten andererseits mit trainierten Merkmalen für typische Objektstrukturen.*

*Zur Gewinnung eines Trainingsdatensatzes werden unterschiedliche realistische Punktdichten mit variierendem Rauschen generiert und ausgewertet. Die Untersuchungen zeigen, dass die Abweichungen der Eigenwerte der Trainingsdaten von den analytischen Werten bei geringem Rauschen die Klassifikationsleistung nicht nachteilig verändern. Dadurch kann gezeigt werden, dass für die hier vorgestellten Strukturen keine Trainingsdatensätze erforderlich sind und eine unüberwachte Klassifikation basierend auf den analytischen Merkmalen typischer Objektstrukturen möglich ist. Darauf aufbauend werden speziell Punkte gesucht, die Teil eines Linienstückes sein können. Durch Akkumulation dieser Punkte zu Linienstücken erhält man Objektberandungen im 3D-Raum. Das Verfahren wird bei verschiedenen urbanen Szenen erprobt und die Ergebnisse diskutiert.*

## 1 Introduction

Three-dimensional building models have become important during the past for various applications like urban planning, enhanced navigation or visualization of touristy or historic objects. They can increase the understanding and explanation of complex scenes and support the

---

<sup>1</sup> Hermann Gross, FGAN-FOM, Research Institute for Optronics and Pattern Recognition, 76275 Ettlingen, Germany; E-mail: gross@fom.fgan.de

<sup>2</sup> Boris Jutzi, FGAN-FOM, Research Institute for Optronics and Pattern Recognition, 76275 Ettlingen, Germany;  
E-mail: jutzi@fom.fgan.de

<sup>3</sup> Ulrich Thoennessen, FGAN-FOM, Research Institute for Optronics and Pattern Recognition, 76275 Ettlingen, Germany; E-mail: thoe@fom.fgan.de



decision process of operation planning. The benefit for several applications was demonstrated utilizing LIDAR data (BRENNER et al., 2001).

For decision support and operation planning the real urban environment should be available. In most cases the object models of interest are not obtainable and especially in time critical situations the 3D models must be generated as fast and accurate as possible.

Different approaches to generate the 3D models of urban scenes are discussed in the literature. Building models are typically acquired by (semi-) automatic processing of Laserscanner elevation data or aerial imagery (BAILLARD et al., 1999; GEIBEL & STILLA, 2000). For large urban scenes LIDAR data can be utilized (GROSS & THOENNESSEN, 2005). POLLEFEYS (1999) uses projective geometry for a 3D reconstruction from image sequences. FRASER et al. (2002) use stereo approaches for 3D building reconstruction. VOSSELMAN et al. (2004) describes a scan line segmentation method grouping points in a 3D proximity.

Airborne systems are widely used but also terrestrial Laserscanners are increasingly available. The latter ones provide a much higher geometrical resolution and accuracy (mm vs. dm) and they are able to acquire fine building facade details which are an essential requirement for a realistic virtual visualization.

In this paper an approach for the segmentation of building boundaries is presented. Analytical considerations give hints to extract these characteristic object structures. We have realized and tested the detection of building boundaries which are approximated by lines. Also a quality measure for the extracted lines is determined. The capability of the algorithm is not limited to building boundaries it could be additionally demonstrated that the detection of overhead wires is possible.

In Chapter 2 the calculation of additional point features is described. The features are normalized with respect to translation, scale and rotation. In Chapter 3 typical constellations of points are discussed and discriminating features are presented. Examples for the combination of eigenvalues and structure tensor are shown. For typical situations analytical feature values are derived. For the classification process the results of the trained feature values are discussed in Chapter 4 and the trained values are compared with the analytical values. The generation of lines is described in Chapter 5. Points with the same eigenvectors are assembled and approximated by lines. Resulting 3D boundaries of objects are shown for different data sets. In Chapter 6 the possibilities using additional features are summarized. Outstanding topics and aspects of the realized method are discussed.

## 2 Additional point features

A Laserscanning device delivers 3D point measurements in an Euclidian coordinate system. For airborne systems mostly the height information is stored in a raster grid with a predefined resolution. Image cells without a measurement are interpolated by considering their neighborhood.

An example data set gathered by an airborne Laserscanner system (TopoSys) as 3D points is shown in Figure 1a. The color corresponds to the height. A transformation to a raster image selecting the highest value for each pixel yields to Figure 1b and after filling missing pixels with a Median operation Figure 1c is received. Due to the filtering the image in Figure 1c does not

represent the original 3D information anymore. The horizontal position is slightly different and some of the height values are interpolated to fill the gaps even if there was no measured value available. Additionally, sometimes more than one measurement for a resolution cell exists considering first and last echo or combining data of several measurement campaigns.

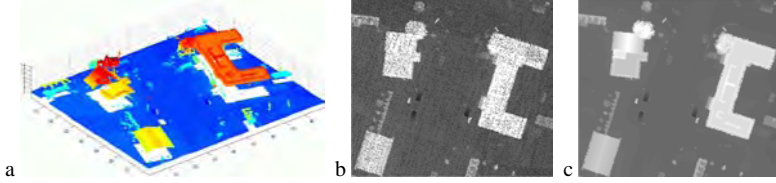


Figure 1. Point clouds measured with TopoSys® Laserscanner  
a) colored by height, Raster image based on point clouds: b) without, c) with interpolated values

An example of data received by a terrestrial Laserscanner (Z+F sensor) for a dense point cloud colored by intensity is shown in Figure 2.

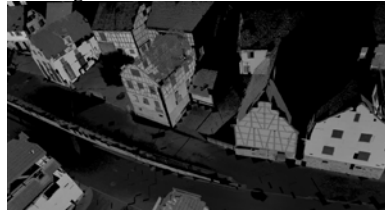


Figure 2. Point clouds of a Z+F sensor colored by intensity

In contrary to the airborne data the projection of terrestrial Laser data along any direction is not very reasonable. Especially the combination of airborne (Figure 1) and terrestrial (Figure 2) Laserscanning data requires directly the analysis in the 3D data.

## 2.1 Calculation of the covariance matrix utilizing a 3D spherical volume cell

A 3D spherical volume cell with radius  $R$  is assigned to each point of the cloud. All points in a spherical cell will be analyzed. The 3D covariance matrix as described by MAAS & VOSSELMAN (1999) are discussed and further improved as described in GROSS & THOENNESSEN (2006).

For each point a spherical neighborhood with the radius  $R$  is constructed. Mean values  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  the second order  $i + j + k = 2$  are calculated and normalized by

$$\tilde{m}_{ijk} = \frac{\sum_{l=1}^N (x_l - \bar{x})^i (y_l - \bar{y})^j (z_l - \bar{z})^k}{R^{i+j+k} N} \quad (1)$$

Neither the number of points nor the chosen physical unit for the coordinates, the radius and the weighting factor influences the values of the covariance matrix.

For each point of the whole data set a symmetrical covariance matrix is calculated by

$$M = \begin{pmatrix} \tilde{m}_{200} & \tilde{m}_{110} & \tilde{m}_{001} \\ \tilde{m}_{110} & \tilde{m}_{020} & \tilde{m}_{011} \\ \tilde{m}_{001} & \tilde{m}_{011} & \tilde{m}_{002} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

The calculation of the eigenvalues  $\lambda_i$  and eigenvectors  $\vec{e}_i$  with  $i = 1, 2, 3$  delivers features for each point. The eigenvalues are invariant concerning translation, rotation, and scaling.

## 2.2 Point distribution in 3D space

In this section we describe the influence of the distribution of point measurements concerning the proposed features.

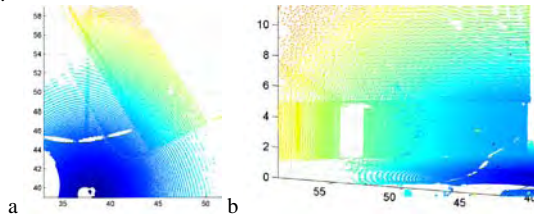


Figure 3. Point clouds of a terrestrial Laserscanner:

a) vertical view, b) horizontal view (color indicates the distance to the sensor: blue=close, red=far away)

	S	Structure	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$
1		Isolated point	0	0	0
2		End of a line	$\frac{1}{12}$	0	0
3		Line	$\frac{1}{3}$	0	0
4		Half plane	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4} \left( 1 - \frac{64}{9\pi^2} \right) = 0.07$	0
5		Plane	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	0
6		Quarter plane	$\frac{1}{4} \left( 1 - \frac{2}{\pi} \right) = 0.09$	$\frac{1}{4} + \frac{1}{2\pi} - \frac{32}{9\pi^2} = 0.05$	0
7		Two planes	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{8} - \frac{8}{9\pi^2} = 0.03$
8		Three planes	$\frac{1}{6} \left( 1 - \frac{1}{\pi} \right) = 0.11$	$\frac{1}{6} \left( 1 - \frac{1}{\pi} \right) = 0.11$	$\frac{1}{6} \left( 1 + \frac{2}{\pi} \right) - \frac{2^{\pi}}{3^{\pi} \pi^2} = 0.03$
9		Two planes 60°	0.25	0.1875	0.01747

Table 1. Eigenvalues for some typical object structures.

Figure 3 shows as an example for the point distribution derived by a terrestrial Laserscanner (Zoller+Fröhlich). The point density depends on the distance of the object to the sensor and also on the incidence angle between laser beam and normal vector onto the object surface. For the airborne Laserscanner (TopoSys®) mounted on an aircraft the point density can be much higher in flight direction than perpendicular to the flight direction. In both cases there is no uniform distribution of the measured points.

The investigations show that a non homogenous distribution does not influence the eigenvalues essentially as long as the radius of the neighborhood is large enough. This means points inside a plane are characterized as plane points if the neighborhood encloses at least five points in all directions and the rate of the point distances for any two different directions is smaller than 5:1. Table 1 shows some typical object structures with their corresponding eigenvalues.

### 3 Filtering of 3D points

After calculating the covariance matrix for each point in the data set by considering the local environment defined by a sphere additional features for each point are derived. These features are the center of gravity, the geometrical distance between center of gravity to the point, the eigenvectors, the eigenvalues and the number of points inside the sphere. The same features can be used to determinate the object characteristics.

Table 1 shows the eigenvalues of the covariance matrix of some special point configurations. The first six rows present 2D and the last three rows 3D object structures. The eigenvalues for the typical object structures are calculated analytically. For an ideal line two eigenvalues are zero and one of it is greater than zero. If test points inside a plane are of interest their eigenvalues have to be compared with the analytical eigenvalues  $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.25 \wedge \lambda_3 = 0$  for a correct plane.

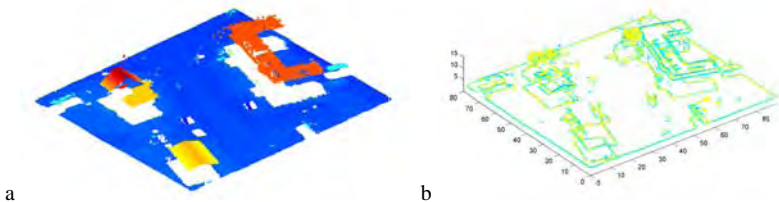


Figure 4. a) Points identified as plane points, b) Points with one high and two small eigenvalues.

Figure 4a shows all points with eigenvalues fulfilling the criteria for planes. The color indicates the object height. In Figure 4b only the edge points are depicted corresponding to Table 1 row 4. The introduced classification is shown for a more complex building. The results are depicted in Figure 5 with a vertical and oblique view to demonstrate the geometrical relation of the 3D points.

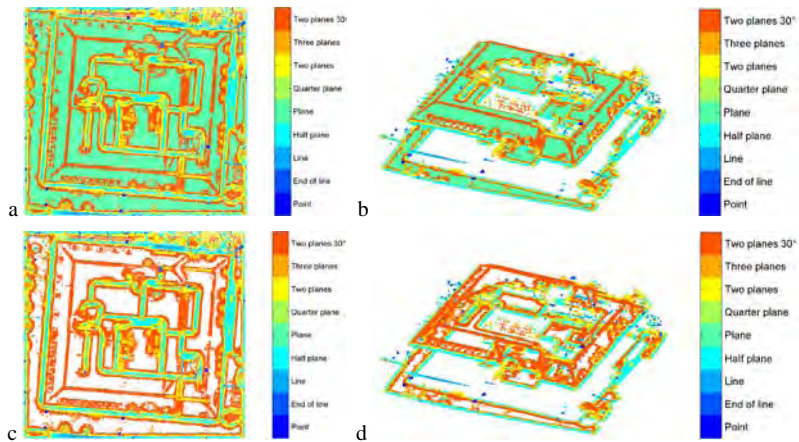


Figure 5. Classified points according to Table 1:  
a&b: with all points, c&d: without points inside a plane,  
a&c: vertical view, b&d: oblique view.

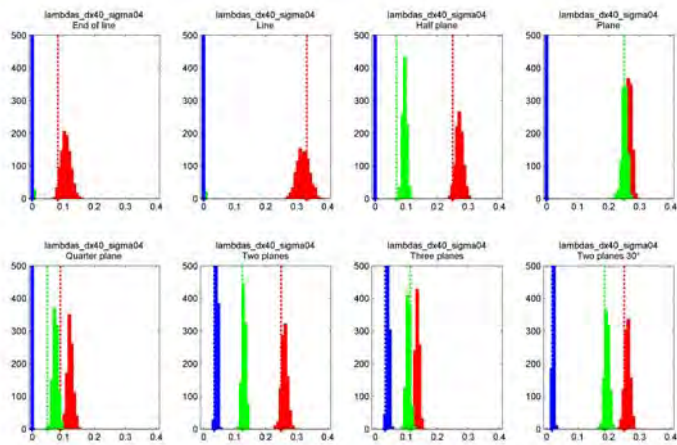


Figure 6. Histograms of the eigenvalues and comparison with the analytical values (dashed lines) for  $dx = 0.4R$  and  $\sigma = 0.04R$  for all structures (red: first, green: second, blue: third eigenvalue).

#### 4 Comparision of the classification based on analytical versus trained feature values

The analytical calculated values in Table 1 do not correspond to the statistical averages, which can be expected for the relevant structures of real data. Usually, for an example, the smallest eigenvalue of points belonging to a plane do not converge to  $\lambda_3 = 0$ . Already very small deviations of points from a flat surface yield to  $\lambda_3 > 0$ . Therefore for all the structures in Table 1 inside a spherical neighborhood with radius  $R$  points with the different normalized distances  $dx/R \in \{0.03, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4\}$  are generated. Each coordinate of the position of the points is modified by a Gaussian distributed noise with the normalized standard deviation  $\sigma/R \in \{0.0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04\}$ . For each parameter combination and structure 1000 point clouds are tested. The mean value and the standard deviation of every 3 eigenvalues were determined. The histograms of one test set for each structure are drawn in Figure 6. The distribution of the eigenvalues seems to be Gaussian with center near by the analytical values.

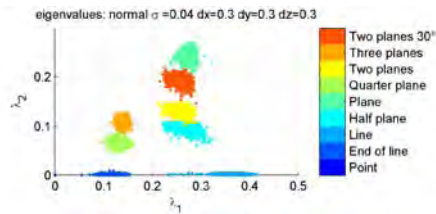


Figure 7. Eigenvalue point cloud projection along the axis of the smallest eigenvalue.

In the next steps the 3 eigenvalues are considered as a point of a 3D space. For a small standard deviation the point cloud of eigenvalues results in a small accumulation of points. If is increasing the cluster is extending and nearby clusters may overlap. Figure 7 shows the 2D-projection along the axis of the eigenvalue  $\lambda_3$ . Projections along the two other eigenvalues demonstrate the separability of the cluster for each structure.

The eigenvalues of the points for each structure define a training record from which the three mean values  $\bar{\lambda}_s = \frac{1}{N} \sum_{p \in S} \lambda_p$  as well as the associated eigenvalue-covariance-matrix

$C_s = \sum_{p \in S} (\lambda_p - \bar{\lambda}) (\lambda_p - \bar{\lambda})^T$  can be calculated, where  $N$  is the number of eigenvalue-points of the

structure. The distance of any point  $\lambda$  of the eigenvalue space is determined by using the Mahalanobisdistance  $d(\lambda, S) = (\lambda - \bar{\lambda}_s)^T C_s^{-1} (\lambda - \bar{\lambda}_s)$ . This measure gives a distance for any test eigenvalue-point to the different structures. These eight distances of every point against their own and all other structures (except for isolated point) are listed in the Figure 8. The points of a structure are plotted and colored in accordance to their membership  $S$  and drawn in the interval  $[S - 1, S]$  (horizontal axis). The vertical axis represents the logarithm of the distance of each

eigenvalue point to each structure. In the 1st picture the distances between the eigenvectors of all test records of all structures against the structure "End of line" are drawn. The remaining pictures show the respective distance of all test points to the other structures. The green line mark the value of the Chi-square tests  $\chi^2_{0.01,2}$ . The percentage number of points of each structure with a smaller distance has indicated. With increasing noise the distance of a point of a structure to a different structure decreases. Therefore false classification increases.

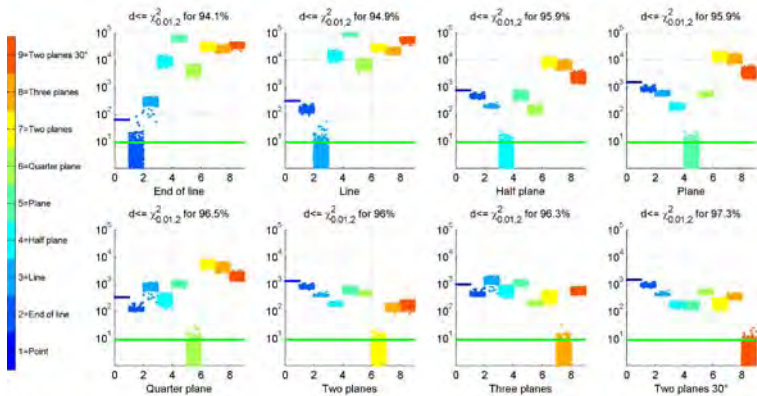


Figure 8. Distances of the eigenvalue points to all classes.

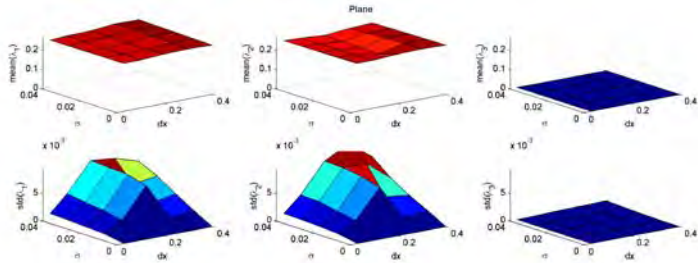


Figure 9. Mean value and standard deviation of the three eigenvalues of the training set for a plane.

Figure 9 shows the mean value and the standard deviation of the eigenvalues of the training set for a plane dependent on the point density and the noise. The mean values approximate the analytical eigenvalues with a very small standard deviation.

A comparison between the mean value of the eigenvalues of the training set for a plane and the analytical values is shown in Figure 10. The differences depend on the point density and the noise. A high point density delivers nearly the analytical eigenvalues. The non monotonic

behavior of the curve for  $\lambda_2$  may be caused by the approximation of a plane by nearly equidistant points (discretization effects). The mean value of the third eigenvalues is positive but very small.

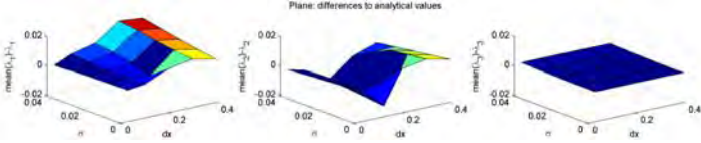


Figure 10. Differences between the mean value of the eigenvalues of the training set for a plane and the analytical values.

For the same points the Euclidean distances in the eigenvalue space against the analytical eigenvalues were calculated. Within the tested mean point intervals and the investigated noise all the points were assigned to the correct structure. Based on this investigation the classification of elevation points can be realized by nearest neighbor classification in the eigenvalue space of the structures of Table 1. This is possible as far the noise is lower than 4% of the radius of the neighborhood environment.

## 5 Line generation

After the classification, which based on the analytical values, the relevant points can be selected for line generation. Therefore all points which are classified as edge points are assumed to belong to a line. These points are assembled to lines by a grouping process. The greatest eigenvalue  $\lambda_1$  and its eigenvector  $\vec{e}_1$  is considered. Consecutive points with a similar eigenvector, lying inside a small cylinder are grouped together and approximated by a line.

Let  $Cl$  be the set of all points of the cloud. For initialization any point  $\vec{p} \in Cl$  with eigenvector  $\vec{e}_1^p$  as feature is used to start the procedure. This point is called the trigger point. All points  $\vec{c}$  are processed to determine the set

$$C = \left\{ \vec{c} \in Cl \mid \left\| \vec{e}_1^p \circ \vec{e}_1^c \right\| > c_{\min} \right\}. \quad (3)$$

This set contains all points with nearly the same or opposite direction of the first eigenvector proofed by comparing the inner product of two vectors against a given threshold  $c_{\min}$ . Using the trigger point and its first eigenvector a line hypothesis is given by:

$$\vec{g} = \vec{p} + \mu \vec{e}_1^p \quad (4)$$

The scalar components for  $\vec{c} \in C$  to each eigenvector are

$$\mu_i(\vec{c}, \vec{p}) = (\vec{c} - \vec{p}) \circ \vec{e}_i^p. \quad (5)$$

Due to the normalization of the eigenvectors these components describe the distances along each direction. The distance of the point  $\vec{c}$  to the line is

$$d(\vec{c}, \vec{p}) = \sqrt{\mu_2^2(\vec{c}, \vec{p}) + \mu_3^2(\vec{c}, \vec{p})} \quad (6)$$



Let  $D = \{\bar{c} \in Cl \mid d(\bar{c}, \bar{p}) \leq d_{\max}\}$  be the set of edge points inside the cylinder given by  $\bar{g}$  with the given radius  $d_{\max}$ . The intersection  $GP = C \cap D$  includes all edge points with nearly the same first eigenvector as the trigger point and not far away from the straight line given by the trigger point and its first eigenvector.

Collinear edges of different buildings in a row may belong to  $GP(\bar{p})$ . Therefore the contiguity of the points in the neighborhood of  $\bar{p}$  is examined. The scalar values  $\mu_i(\bar{c}, \bar{p})$  describe the projection of the points onto the straight line. Let  $\mu_s(\bar{c}, \bar{p})$  a sorted list of the  $\mu_i(\bar{c}, \bar{p})$ . Because  $\mu_s(\bar{p}, \bar{p}) = 0$ , gaps defined by an acceptable value  $g_{\max}$  on the left and the right side of 0 along the line hypothesis have to be found.  $\mu_{s_L} \leq 0$  is the left boundary and  $\mu_{s_R} \geq 0$  is the right boundary if

$$\begin{aligned} \mu_{s_{L-1}} + g_{\max} &< \mu_{s_L} \wedge \mu_{s_R} + g_{\max} < \mu_{s_{R+1}} \\ \wedge \mu_{s_{j-1}} + g_{\max} &\geq \mu_{s_j} \quad \forall L < j \leq R \end{aligned} \quad (7)$$

Let  $GP_s = \{\bar{c} \in GP \mid \mu_{s_L} \leq \mu(\bar{c}, \bar{p}) \leq \mu_{s_R}\}$  the set of points along the straight line without gap with respect to  $\bar{p}$ . For determination of the line the mean values  $\bar{cm} = \frac{1}{n} \sum_{\bar{c} \in GP_s} \bar{c}$  are calculated where  $n$  is the number of points in  $GP_s$ . The direction of the line is given by the eigenvector  $\bar{e}_1$  belonging to the greatest eigenvalue of the covariance matrix  $CM$ . The elements of the matrix are

$$cm_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{\bar{c} \in GP_s} (x - xm)^i (y - ym)^j (z - zm)^k \quad (8)$$

where

$$\begin{pmatrix} x & y & z \end{pmatrix} = \bar{c} \quad \text{and} \quad \begin{pmatrix} xm & ym & zm \end{pmatrix} = \bar{cm} \quad (9)$$

The straight line is described by  $\bar{x}l = \bar{cm} + \mu \bar{e}_1$ . Start point and endpoint are given by

$$\bar{x}a = \bar{cm} + \min_{\bar{c} \in GP_s} (\bar{c} \circ \bar{e}_1) \bar{e}_1 \quad \text{and} \quad \bar{x}e = \bar{cm} + \max_{\bar{c} \in GP_s} (\bar{c} \circ \bar{e}_1) \bar{e}_1 \quad (10)$$

The length of the line is  $L = \|\bar{x}e - \bar{x}a\|$ . The eigenvalues of  $CM$  can be normalized by  $v_i = \frac{\lambda_i}{L^2}$  to be independent from length. These normalized eigenvalues are reasonable for a quality assessment of the lines.

The above mentioned process is repeated for all points which are not assigned to a line until each point belongs to a line or can not generate an acceptable line.

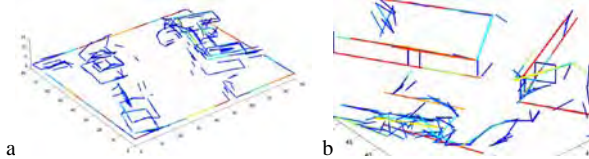


Figure 11. Lines generated from edge points for the point clouds of  
a) airborne elevation data, b) terrestrial elevation data.

Figure 11a shows the results of the line generation for the data set shown in Figure 1. The color indicates the height of the lines. The eaves as well as the ground plan of the buildings are approximated by lines. For the detection of the ridge of the saddle roof a readjustment of the thresholds for the eigenvalues might be recommended to improve the results especially for roofs with small inclination.

For the scene from Figure 3 the approximation lines are shown in Figure 11b. The ridge line, the contour lines at the bottom of the building and the boundary lines of the door are detected.

The proposed method delivers not only edges of buildings also the overhead wires of tramways in a city can be detected. For data from the TopoSys® sensor Figure 12 displays the Last- and FirstEcho and the generated lines of the power lines of the tram.

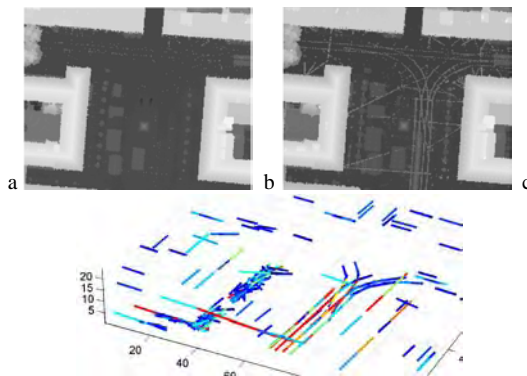


Figure 12. a) LastEcho of a city scene, b) FirstEcho, c) Lines generated from edge points for overhead wires.

## 6 Conclusion and outlook

For exploiting Laser scanning data the processing of the original 3D point clouds is proposed. Additional features for each point of the cloud can be calculated from the covariance matrix including all neighbor points. The neighborhood can be investigated by considering a sphere. The quality of the resulting eigenvalues and the eigenvectors of the matrix strongly depend on the spatial resolution and the number of points inside the sphere. The new features are invariant with respect to position, rotation and scale.

The additional features are appropriate for classification of the points as edge, corner, plane or tree points. For some typical situations analytically determined eigenvalues are opposed to calculated eigenvalues of real data for comparison. The greatest eigenvalue can be used for filtering edge like points.

The described method for generation of lines combines consecutive points with the same eigenvector inside a small cylinder without any gap. The presented results are promising.

Further investigations are planned concerning the fusion of the data on basis of the point clouds and/or on a higher level of lines. Especially the construction of planes assembling plane like points should be investigated in future.

## 7 Literature

- BAILLARD, C.; SCHMID, C.; ZISSERMAN, A. & FITZGIBBON, A., 1999: Automatic line matching and 3D reconstruction from multiple views. In: ISPRS Conference on Automatic Extraction of GIS Objects from Digital Imagery 32, pp. 69-80.
- BRENNER, C.; HAALA, N. & FRITSCH, D., 2001: Towards fully automated 3D city model generation. In: Baltsavias, E., Grün, A. and van Gool, L., (Eds), Proc. 3rd Int. Workshop on Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, pp. 47-57.
- FRASER, C. S.; BALSAVIAS, E. & GRUEN, A., 2002: Processing of IKONOS Imagery for Submetre 3D Positioning and Building Extraction. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 56 (3), pp. 177-194.
- GEIBEL, R. & STILLA, U., 2000: Segmentation of Laseraltimeter data for building reconstruction: Comparison of different procedures. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 33 (Part B3), pp. 326-334.
- GROSS, H. & THOENNESSEN, U., 2005: 3D Modeling of Urban Structures. Joint Workshop of ISPRS/DAGM Object Extraction for 3D City Models, Road Databases, and Traffic Monitoring CMRT05, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 36 (Part 3/W24), pp. 137-142.
- GROSS, H. & THOENNESSEN, U., 2006: Extraction of Lines from Laser Point Clouds. In: Förstner, W., Steffen, R. (Eds) Symposium of ISPRS Commission III: Photogrammetric Computer Vision PCV06. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 3), pp. 86-91.
- JUTZI, B.; NEULIST, J. & STILLA, U., 2005: Sub-Pixel Edge Localization Based on Laser Waveform Analysis. In: Vosselman, G., Brenner, C., (Eds) Laserscanning 2005. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 36 (Part 3/W19), pp. 109-114.
- MAAS, H. & VOSSelman, G., 1999: Two algorithms for extracting building models from raw Laser altimetry data. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54 (2-3), pp. 153-163.
- POLLEFEYS, M., 1999: Self-Calibration and Metric 3D-Reconstruction from Uncalibrated Image Sequences, PhD-Thesis, K. U. Leuven.
- VOSSelman, G.; Gorte B.; Sithole G. & Rabbani T., 2004: Recognizing structure in Laserscanner point clouds. Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 46 (Part 8/W2), pp. 33-38.

## Vergleich von unterschiedlichen Verfahren zur Fusion von TerraSAR-X und optischen Daten

SASCHA KLONUS<sup>1</sup> & MANFRED EHLERS<sup>2</sup>

*Zusammenfassung: In dieser Studie werden Daten des hochauflösenden Radarsatelliten TerraSAR-X verwendet, um diese mit multispektralen SPOT 5 Daten zu fusionieren. Um diese fusionierten Daten zu erstellen, werden unterschiedliche Verfahren wie IHS, Gram Schmidt, PCA, UNB, CN-Spectral Sharpening und Ehlers Fusion miteinander verglichen. Diese Verfahren wurden bisher überwiegend dazu eingesetzt optische Daten zu fusionieren. Ihre Qualität bei der Fusion von Radar mit optischen Daten wird in dieser Untersuchung bewertet. Die Evaluation der Qualität beruht auf einer visuellen und statistischen Analyse. Das Ergebnis zeigt, dass einzig die Ehlers Fusion Bilder erzeugt, die kaum Farbveränderungen zeigen und gleichzeitig die räumlichen Informationen der TerraSAR-X Szene in das multispektrale Bild integriert.*

### 1 Einleitung

Die ikonische Bildfusion wird generell verwendet, um hoch aufgelöste panchromatische Daten mit den spektralen Informationen von räumlich niedriger aufgelösten multispektralen Daten zu kombinieren, so dass ein hoch aufgelöstes multispektrales Bild entsteht. Das Problem bei der Fusion von Radar und optischen Daten ist die Farberhaltung der optischen Daten, denn Radar Daten stellen besondere Herausforderungen an die Fusionsverfahren, da zwei komplett unterschiedlich arbeitende Systeme, ein aktiver und ein passiver Sensor, bei dieser Art von Fusion verwendet werden. Während der optische Sensor die elektromagnetische Strahlung der Erdoberfläche bzw. der Geobjekte aufnimmt, sendet der Radar Satellit elektromagnetische Wellen im Mikrowellenbereich aus, nimmt dabei die von Objekten reflektierten Echos auf und wertet sie nach verschiedenen Kriterien aus. Beim Radar wird im Gegensatz zum optischen Sensor die Richtung und Entfernung zum Objekt oder auch die Relativbewegung gemessen.

Viele Publikationen haben sich bereits mit der Fragestellung beschäftigt, wie man hochaufgelöste panchromatische Daten mit niedriger aufgelösten multispektralen Daten fusionieren kann, ohne die spektralen Werte zu verändern (z. B. WELCH & EHLERS 1987; GONZÁLEZ-AUDÍCAN et al. 2006). Über die letzten Jahre sind einige verbesserte Algorithmen entwickelt worden, die Farbveränderungen minimieren und gleichzeitig räumliche Verbesserung bewirken sollen. Diese Methoden beruhen zumeist auf Wavelet Transformationen (OTAZU et al., 2005; LILLO-SAAVEDRA & GONZALO, 2006).

1) Sascha Klonus, Institut für Geoinformatik und Fernerkundung der Universität Osnabrück, Seminarstr. 19a/b, 49069 Osnabrück; E-mail: sklonus@igf.uni-osnabrueck.de

2) Manfred Ehlers, Institut für Geoinformatik und Fernerkundung der Universität Osnabrück, Seminarstr. 19a/b, 49069 Osnabrück; E-mail: mehlrs@igf.uni-osnabrueck.de

## 2 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet liegt in Nordspanien, südwestlich der Stadt Vitoria Gasteiz. Die Szene zeigt die Region rund um das Dorf Santo Domingo de la Calzada. Die TerraSAR-X Szene (Abb. 1 links) wurde im hochauflösenden Spot Mode mit 1 m Bodenauflösung aufgenommen und vom DLR (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt) bereitgestellt. Die Szene wurde gefiltert mit einem Despeckle Algorithmus der Universität Würzburg (THIEL et al. 2008).

Die multispektrale Szene (Abb. 1 rechts) wurde vom SPOT 5 am 10. April 2005 aufgenommen, mit einer geometrischen Auflösung von 10 m. Sie wurde auf die Auflösung der TerraSAR-X Szene unter Benutzung der kubischen Faltung formatiert. Dieser Ausschnitt wurde ausgewählt, da er sowohl landwirtschaftliche Flächen enthält, als auch Gebäude und Straßen, beides Gebiete die oftmals Probleme bei der Fusion darstellen.

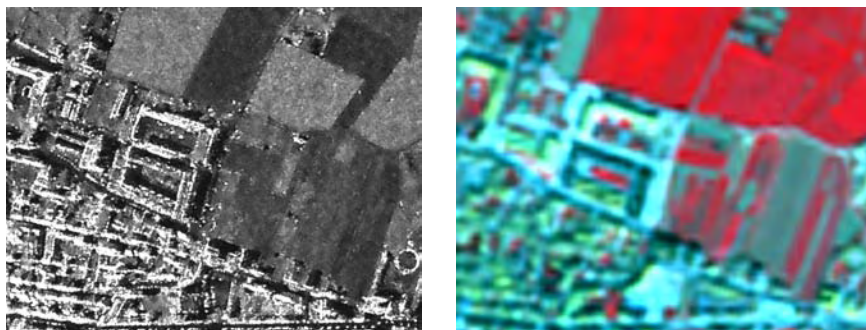


Abb. 1: Gefilterte TerraSAR-X Szene (links), aufgenommen im hochauflösenden Spot Mode am 3. Mai 2008 ©DLR(2008) und multispektrale SPOT Szene (rechts) aufgenommen am 10. April 2005, dargestellt in der Bandkombination 3 (NIR), 2 (rot), 1 (grün).

## 3 Visuelle Auswertung

Insgesamt wurden zehn unterschiedliche Verfahren auf die Eingangsdatensätze angewandt (Tab. 1). Die Ergebnisse der Fusion zeigen die Abb. 2 – 6. Bei der visuellen Auswertung wurden zunächst die einzelnen fusionierten Kanäle mit der Original SPOT Szene verglichen und danach die Falschfarbeninfrarot Bandkombination (Band 3, Band 2, Band 1) betrachtet. Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der verschiedenen Fusionsverfahren. Alle präsentierten Abbildungen werden in der Bandkombination 3,2,1 (NIR, rot, grün) dargestellt.

Das mit der AWLP fusionierte Bild (Abb. 2 links) verändert die spektralen Werte nur leicht, die Struktur des Bildes wird verbessert, allerdings entstehen insbesondere an den Ecken und Kanten Artefakte, die das Bild unscharf aussehen lassen.

Verfahren	Literatur
AWLP (Additive Wavelet Proportional)	OTAZU et al., 2005
Brovey	HALLADA & COX, 1983
CN (Color Normalized) Spectral Sharpening	VRABEL et al., 2002
Ehlers	KLONUS & EHLERS, 2007
Gram Schmidt	LABEN et al., 2000
HPF (High Pass Filtering)	GANGKOFNER & HOLCOMB, 2008
Modifizierte IHS (Intensity Hue Saturation)	SIDDIQUI, 2003
Multiplikation	CRIPPEN, 1987
Principal Component Transformation (PC)	CHAVEZ et al., 1991
UNB (University of New Brunswick)	ZHANG, 2004

Tab. 1: Korrelationskoeffizienten zwischen fusioniertem und originalem Multispektralbild

Die räumliche Verbesserung ist beim Brovey Verfahren (Abb. 2 rechts) sehr gut zu erkennen. Die Farbveränderungen sind allerdings klar sichtbar und in einigen Teilen des Bildes erscheinen Farben, die unnatürlich in einer Falschfarbeninfrarot-Darstellung sind.

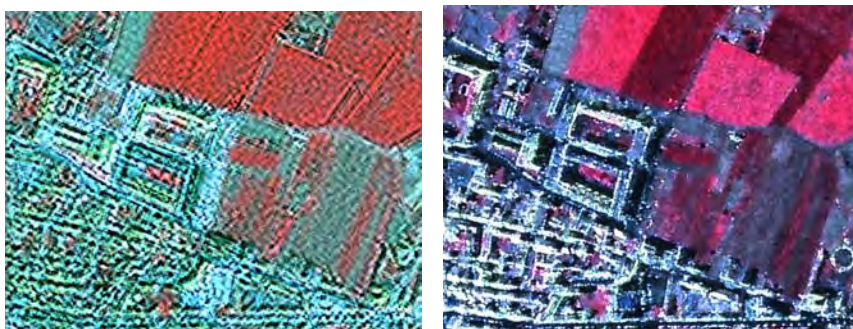


Abb. 2: TerraSAR-X Szene fusioniert mit der multispektralen SPOT Szene unter Verwendung des AWLP Verfahrens (links) und der Brovey Methode (rechts), dargestellt in der Bandkombination 3, 2, 1.

Das CN Spectral Sharpening (Abb. 3 links) wurde so verändert, dass auch Radardaten als hochauflösender Eingangsdatensatz verwendet werden konnten. Dazu wurde im Header des Radar Eingangsdatensatzes der Wellenlängenbereich verändert, so dass dieser nun im Wellenlängenbereich des SPOT 5 Datensatzes liegt. Es werden nämlich nur die Bänder geschärft, die im Wellenlängenbereich des hochauflösenden Bildes liegen. Diese Inkompatibilität war eventuell der Grund für die enorm veränderten spektralen Werte im fusionierten Bild. Dies trifft besonders für Regionen wie Kanten von Gebäuden zu, in denen die TerraSAR-X Szene extrem hohe Grauwerte aufweist. Hier sind Werte zu finden, die zufällig scheinen. Auch die räumliche Verbesserung wird durch diese Farbveränderungen stark beeinträchtigt.

Die Ehlers Fusion (Abb. 3 rechts) zeigt dagegen eine sehr gute Farberhaltung; im Vergleich mit dem Original sind kaum Farbveränderungen sichtbar. Die räumliche Verbesserung ist gut sichtbar und die Qualität der Farberhaltung lässt verbesserte Interpretationen zu.

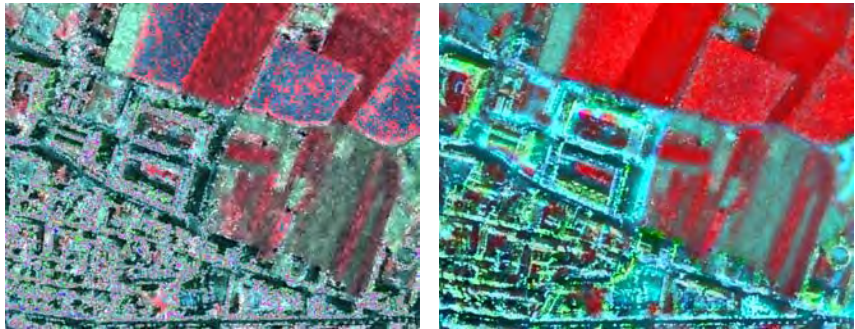


Abb. 3: TerraSAR-X Szene fusioniert mit der multispektralen SPOT Szene unter Verwendung des CN Verfahrens (links) und der Ehlers Fusion (rechts), dargestellt in der Bandkombination 3, 2, 1.

Die Ähnlichkeit der spektralen Werte im Gram Schmidt fusionierten Bild (Abb. 4 links) mit dem originalen SPOT Bild ist sehr gering. Die verbesserten Strukturen an den Ecken und Kanten sind sichtbar, aber schlechter als der Ehlers Fusion. Im dritten Kanal (nahes Infrarot) werden hohe Grauwerte des originalen multispektralen Bildes durch niedrige Grauwerte repräsentiert. Das führt zu Farbveränderungen im Bild, insbesondere in diesem Kanal.

Der Kontrast des mit der HPF fusionierten Bildes (Abb. 4 rechts) ist sehr stark. Die Farben sind nur leicht verändert, allerdings zeigen die Kanten von Gebäuden oder Feldgrenzen mittlere bis starke Farbveränderungen. Die räumliche Verbesserung zeigt allgemein akzeptable Ergebnisse.

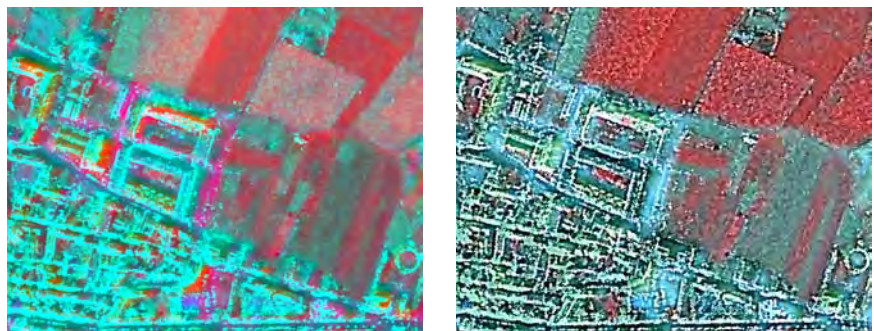


Abb. 4: TerraSAR-X Szene fusioniert mit der multispektralen SPOT Szene unter Verwendung des Gram Schmidt Verfahrens (links) und des HPF (rechts), dargestellt in der Bandkombination 3, 2, 1.



Die modifizierte IHS Fusion (Abb. 5 links) zeigt eine ähnliche Farberhaltung wie die HPF. Die Struktur im fusionierten Bild kann zwar besser erkannt werden als im originalen multispektralen Bild, ist allerdings verschwommen.

Das durch Multiplikation der beiden Datensätze fusionierte Bild (Abb. 5 rechts) weist stärkere Farbveränderungen auf. Kanten werden durch hohe Grauwerte repräsentiert, die in der Farbe weiß dargestellt werden. Dadurch können Ecken und Kanten klar identifiziert werden.

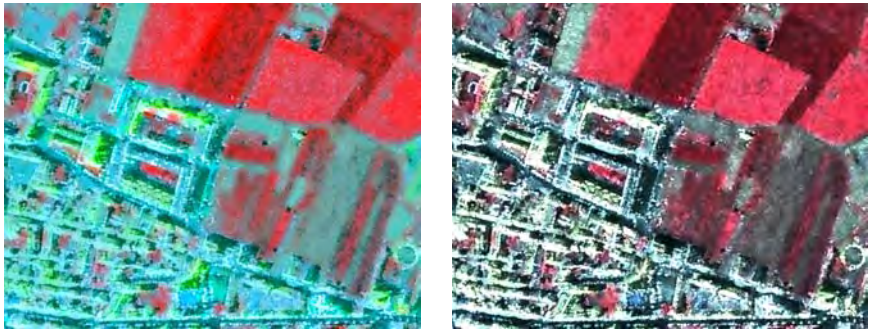


Abb. 5: TerraSAR-X Szene fusioniert mit der multispektralen SPOT Szene unter Verwendung der modifizierten IHS (links) und der Multiplikation (rechts), dargestellt in der Bandkombination 3, 2, 1.

Die PC Fusion (Abb. 6 links) zeigt sehr starke Farbveränderungen in den Spektralwerten. Insbesondere im nahen infraroten Kanal werden ähnlich wie bei der Gram Schmidt Transformation Gebäude durch niedrige Grauwerte repräsentiert. Daher besteht nur eine geringe Ähnlichkeit mit dem Original. Die räumliche Auflösung ist besser als im ursprünglichen multispektralen Bild, dennoch wirkt das Bild verschwommen.

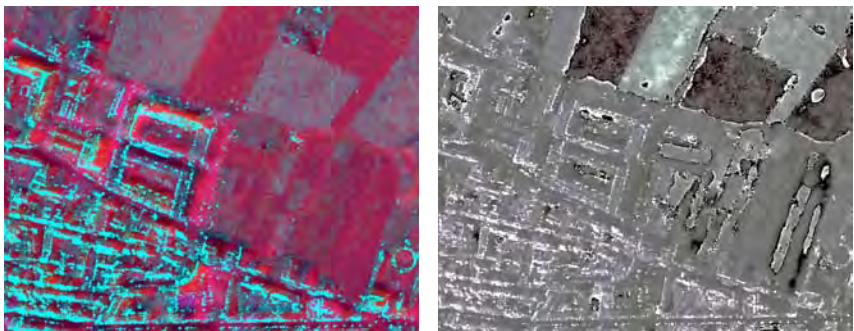


Abb. 6: TerraSAR-X Szene fusioniert mit der multispektralen SPOT Szene unter Verwendung der PCA (links) und des UNB Verfahrens (rechts), dargestellt in der Bandkombination 3, 2, 1.



Das schlechteste Fusionsergebnis zeigt die UNB Fusion (Abb. 6 rechts). Die Farben sind komplett verändert. Die Kanten und Ecken sind deformiert und eine hohe Anzahl an Artefakten erscheint im Bild. Die Struktur zeigt insgesamt nur geringe Verbesserungen gegenüber dem Original. Diese Methode wurde allerdings für die Fusion von Satellitendaten entwickelt, die vom gleichen Sensor im panchromatischen und multispektralen Modus aufgenommen wurden.

## **4 Statistische Auswertung**

### **4.1 Evaluierungsverfahren**

Da die visuelle Analyse subjektiv ist und vom Interpreten stark beeinflusst wird, wurden quantitativ-statistische Analysen durchgeführt. Zur Überprüfung der spektralen Werterhaltung wurden Korrelationskoeffizient, die Grauwertabweichung pro Pixel vom originalen Multispektralbild und SSIM (Structure Similarity Index) ausgewählt.

Die Korrelationskoeffizienten wurden zwischen den originalen multispektralen und den entsprechenden fusionierten Kanälen berechnet. Die höchste Korrespondenz zwischen fusionierten und originalen Bilddaten wird durch den Wert 1 repräsentiert.

Für die Grauwertabweichung pro Pixel (WALD 2002, S. 147-160) ist es nötig, die fusionierten Szenen auf die räumliche Auflösung der originalen multispektralen Szene zu reformatieren. Im Anschluss wird diese reformatierte Szene dann von der multispektralen Szene subtrahiert und der Absolutwert extrahiert. In einem letzten Schritt wird dann die durchschnittliche Abweichung pro Pixel ermittelt. Die geringste Abweichung zum Original hat ein Bild mit dem Wert 0.

Der SSIM wurde von WANG et al. (2004) entwickelt. Der SSIM ist ein Verfahren, das die Helligkeit, den Kontrast und die Struktur des Bildes vergleicht. Er wird für ein lokales 8 x 8 Pixel umfassendes Fenster berechnet. Dieses Fenster wird Pixel für Pixel über das gesamte Bild geschoben und bei jedem Schritt werden die lokalen Statistiken und der SSIM Index in diesem Fenster berechnet. Der Wert variiert in einem Bereich von 0 und 1. Die höchste Korrespondenz mit dem Original zeigen Werte von 1.

In den meisten anderen Analysen wird der Schwerpunkt auf die spektrale Evaluierung gelegt. Allerdings ist es auch notwendig, die Effizienz der Pansharpining Algorithmen im Hinblick auf die räumliche Verbesserung zu überprüfen. Ansonsten würde das multispektrale Originalbild die besten Resultate erzielen, ohne dass eine räumliche Verbesserung erreicht würde. Das Ziel muss also sein, ein fusioniertes Bild zu finden, das die optimale Kombination an Farberhaltung und räumlicher Verbesserung enthält. Zur Überprüfung der räumlichen Verbesserung wurden zwei unterschiedliche Verfahren angewandt, Hochpassfilterung und Kantendetektion.

Zur Messung des Hochpass-Korrelationskoeffizienten werden das Radarbild und das fusionierte Bild mit einem Hochpassfilter gefiltert. Dieses Verfahren wurde von ZHOU et al. 1998 vorgeschlagen. Der Hochpassfilter wird dabei auf jeden Kanal des fusionierten Bildes

angewandt. Die Korrelationskoeffizienten werden dann für jeden Kanal und dem Radarbild berechnet.

Bei der Kantendetektion wird zunächst ein Sobel Filter auf das Radarbild und auf jeden Kanal des fusionierten Bildes angewandt. Anschließend wird ermittelt, wie viele der im hochauflösenden Bild erkannten Ecken auch im fusionierten Bild noch entdeckt werden. Die Werte werden in Prozent angegeben und variieren zwischen 0 und 100. 100 bedeutet, dass sämtliche Kanten des Radarbildes auch im fusionierten Bild zu finden sind.

## 4.2 Diskussion

Die Tabellen (2 - 6) zeigen die Ergebnisse der quantitativen statistischen Untersuchung. Der beste Wert in der Tabelle wurde jeweils rot markiert, der schlechteste blau. Die Fusionsverfahren sind in alphabetischer Ordnung aufgeführt.

Die Ehlers Fusion zeigt die höchsten Korrelationskoeffizienten (Tab. 2). Aber auch AWLP und HPF zeigen noch akzeptable Werte. Die Werte der IHS sind etwas niedriger. Alle anderen Verfahren weisen nur geringe Korrelationen auf. Eine Ausnahme ist die Gram Schmidt Fusion, die akzeptable Werte im nahen Infraroten zeigt. Auch visuell zeigt dieser Kanal bei der Gram Schmidt Fusion die höchste Farberhaltung im Vergleich mit dem Original. Die geringsten Korrelationskoeffizienten weisen die UNB und PC Verfahren auf. Dies war zu erwarten, da sie auch visuell die geringste Ähnlichkeit mit dem Original aufweisen.

	AWLP	Brovey	CN	Ehlers	Gram	HPF	ModIHS	Multi	PC	UNB
<b>Band 1</b>	0.9364	0.5600	0.5697	0.9903	0.4719	0.9116	0.8199	0.7447	0.3450	0.2098
<b>Band 2</b>	0.9244	0.5444	0.6976	0.9899	0.4513	0.9113	0.9164	0.7958	0.2991	0.1388
<b>Band 3</b>	0.9230	0.3240	0.5032	0.9896	0.9447	0.9130	0.8337	0.3753	0.4359	0.3026
<b>Band 4</b>	0.9261	0.3647	0.4487	0.9915	0.5820	0.9167	0.7600	0.6492	0.4470	0.3237
<b>Mean</b>	<b>0.9275</b>	<b>0.4483</b>	<b>0.5548</b>	<b>0.9903</b>	<b>0.6125</b>	<b>0.9132</b>	<b>0.8325</b>	<b>0.6413</b>	<b>0.3818</b>	<b>0.2437</b>

Tab. 2: Korrelationskoeffizienten zwischen fusioniertem und originaleem Multispektralbild

Die Abweichung pro Pixel (Tab. 3) ist ebenfalls bei der Ehlers Fusion am geringsten. Damit zeigt dieses Verfahren erneut die besten Ergebnisse. AWLP, HPF und die modifizierte IHS besitzen noch akzeptable Werte. CN, Gram Schmidt, PC und UNB weisen höhere Abweichungen auf. Interessant ist, dass die Brovey Fusion im ersten Kanal einen Wert aufweist, der wesentlich niedriger ist als in den anderen drei Kanälen.

Die Ergebnisse des SSIM (Tab. 4) sind vergleichbar mit denen der Korrelationskoeffizienten. Im Mittel zeigt die Ehlers Fusion deutlich die besten Resultate. AWLP, HPF und IHS weisen noch akzeptable Werte auf, liegen aber um mehr als 0.2 hinter der Ehlers Fusion. Alle anderen Methoden, mit Ausnahme der Gram Schmidt Fusion im dritten Kanal, präsentieren Werte, die wesentlich geringer als 0.5 sind.

Während die Tabellen 2-4 die statistischen Werte zur Überprüfung der spektralen Werterhaltung zeigten, präsentieren die nächsten beiden Tabellen die Resultate der Evaluierung der räumlichen Verbesserung.

	AWLP	Brovey	CN	Ehlers	Gram	HPF	ModIHS	Multi	PC	UNB
<b>Band 1</b>	3.03	17.11	9.98	1.05	9.60	5.09	5.39	39.12	73.92	10.81
<b>Band 2</b>	5.65	75.64	13.71	1.78	16.10	8.44	5.49	53.62	92.00	18.18
<b>Band 3</b>	4.13	95.10	14.89	1.30	3.57	5.31	6.35	49.19	47.78	11.42
<b>Band 4</b>	3.22	82.70	11.92	1.01	7.74	4.60	5.82	46.38	91.31	9.73
<b>Mean</b>	<b>4.01</b>	<b>67.64</b>	<b>12.62</b>	<b>1.28</b>	<b>9.26</b>	<b>5.86</b>	<b>5.76</b>	<b>47.08</b>	<b>76.25</b>	<b>12.54</b>

Tab. 3: Abweichung pro Pixel zwischen fusioniertem und origalem Multispektralbild

	AWLP	Brovey	CN	Ehlers	Gram	HPF	ModIHS	Multi	PC	UNB
<b>Band 1</b>	0.8214	0.4320	0.4123	0.9741	0.4948	0.8111	0.7181	0.5060	0.0481	0.3119
<b>Band 2</b>	0.7304	0.1596	0.4824	0.9639	0.3614	0.7505	0.7967	0.4551	0.0162	0.1659
<b>Band 3</b>	0.6970	0.1453	0.3148	0.9601	0.9150	0.7962	0.6803	0.3491	0.3633	0.3430
<b>Band 4</b>	0.7285	0.1455	0.2935	0.9680	0.5629	0.8148	0.6308	0.4355	0.0575	0.4252
<b>Mean</b>	<b>0.7443</b>	<b>0.2206</b>	<b>0.3758</b>	<b>0.9665</b>	<b>0.5835</b>	<b>0.7932</b>	<b>0.7065</b>	<b>0.4364</b>	<b>0.1213</b>	<b>0.3115</b>

Tab. 4: SSIM zwischen fusioniertem und origalem Multispektralbild

Bei der Kantendetektion weist die Brovey Transformation die besten Resultate auf. Dies Verfahren zeigte bereits in der visuellen Analyse die besten Ergebnisse. Die Gram Schmidt Transformation zeigt nur im ersten Kanal ein besseres Resultat. Auch die meisten anderen Verfahren besitzen gute Ergebnisse. Die geringsten Werte präsentiert mit nur 83 % der detektierten Kanten im Vergleich mit der TerraSAR-X Szene die AWLP.

	AWLP	Brovey	CN	Ehlers	Gram	HPF	ModIHS	Multi	PC	UNB
<b>Band 1</b>	83.10	94.03	92.35	90.29	94.74	90.80	89.85	92.58	93.89	90.09
<b>Band 2</b>	82.44	96.40	90.03	90.05	94.85	89.92	88.66	92.78	93.92	89.80
<b>Band 3</b>	80.73	95.47	88.68	89.97	91.19	89.59	85.42	92.15	93.61	89.43
<b>Band 4</b>	80.73	96.86	90.59	89.96	94.85	90.24	89.36	92.65	93.87	90.16
<b>Mean</b>	<b>81.75</b>	<b>95.69</b>	<b>90.42</b>	<b>90.06</b>	<b>93.91</b>	<b>90.14</b>	<b>88.32</b>	<b>92.54</b>	<b>93.82</b>	<b>89.87</b>

Tab. 5: Ergebnisse der Kantendetektion; zwischen fusionierter und originaler TerraSAR-X Szene (Angaben in Prozent)

Ein komplett anderes Resultat im Vergleich zur Kantendetektion zeigen die Korrelationskoeffizienten der hochpassgefilterten Bilder des Radar und des fusionierten Bildes. Die Brovey Fusion zeigt erneut die höchsten Werte, die anderen Verfahren produzieren sehr unterschiedliche Resultate. Die HPF präsentiert Koeffizienten um 0.5, die etwas schlechter als die Ehlers Fusion mit Werten zwischen 0.4 und 0.6 sind. Diese drei Verfahren zeigen noch

akzeptable Ergebnisse, alle anderen besitzen nur noch Werte unter 0.5. IHS und Multiplikation weisen Werte zwischen 0.39 und 0.5 auf. Die PC zeigt mit Ausnahme des dritten Kanales noch akzeptable Werte, im dritten liegt eine negative Korrelation vor. Der Grund für diese niedrigen Werte sind vermutlich die Effekte, die bereits im visuellen Vergleich festgestellt wurden. Die Gebäude werden in dem fusionierten Bild durch zu geringe Grauwerte repräsentiert. Im Radarbild werden diese dagegen durch hohe Grauwerte repräsentiert. Diese Aussage trifft ebenso auf die Gram Schmidt Transformation zu, wobei aber die anderen Kanäle bessere Ergebnisse zeigen als die PC. AWLP, CN und UNB besitzen, die nahe bei Null liegen. Korrelationskoeffizienten. Dies war nach der visuellen Analyse zu erwarten, wenn man die fusionierten Bilder visuell betrachtet.

	AWLP	Brovvey	CN	Ehlers	Gram	HPF	ModIHS	Multi	PC	UNB
<b>Band 1</b>	-0.0892	0.5063	0.1271	0.5257	0.9239	0.5103	0.4345	0.4888	0.6455	0.2453
<b>Band 2</b>	-0.0744	0.9888	0.0896	0.5311	0.7054	0.5047	0.3834	0.4807	0.6413	0.2693
<b>Band 3</b>	-0.0450	0.9656	0.0803	0.6185	-0.6725	0.5077	0.3491	0.5003	-0.0050	0.1864
<b>Band 4</b>	-0.0615	0.9740	0.1224	0.4336	0.9322	0.5069	0.4094	0.5009	0.6426	0.2232
<b>Mean</b>	-0.0675	0.8587	0.1049	0.5272	0.4723	0.5074	0.3941	0.4927	0.4811	0.2311

Tab. 6: Korrelationskoeffizienten der Hochpassfilterung zwischen fusionierter und originaler TerraSAR-X Szene

## 5 Bewertung

Aktuelle Verfahren wurden verwendet, um die Effektivität unterschiedlicher Fusionsverfahren zu testen. Es wurde gezeigt, dass es nur mit der Ehlers Fusion möglich ist, Daten zu fusionieren ohne dass sich die spektralen Werte stark verändern. Alle anderen Verfahren können zwar zum großen Teil die räumliche Auflösung erhöhen, zeigen aber starke Farbveränderungen in den fusionierten Bildern, so dass die Interpretation schwieriger wird. Es erweist sich, dass auch hochauflösende Radardaten genutzt werden können, um die räumliche Auflösung multispektraler elektrooptischer Bilddaten zu verbessern. Das geometrische Auflösungsverhältnis zwischen Radar- und Multispektraldaten lag bei 1:10 und soll in Zukunft für größere Unterschiede untersucht werden. So sind Fusionsuntersuchungen von TerraSAR-X mit Landsat TM und SPOT 4 geplant. Zukünftige Arbeiten werden sich ebenfalls mit dem Einfluss der Fusion auf Klassifikationsgenauigkeiten beschäftigen. Desweiteren ist das Ziel die Entwicklung eines quantitativen Verfahrens, das sowohl die räumliche Verbesserung als auch die Spektralwert-Erhaltung überprüft. Andernfalls würde das originale multispektrale Bild die besten Werte erhalten und somit die Fusion überflüssig machen.

## 6 Literaturverzeichnis

BRUMMITT, N. & LUGHADHA, E. N., 2003: Biodiversity: Where's hot and where's not. Conservation Biology, **17** (5), S. 1442-1448.

- CHAVEZ, W.J.; SIDES, S.C. & ANDERSON, J.A., 1991: Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data. *TM & Spot Pan, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57(3), 295 – 303.
- CRIPPEN, R. E., 1987: A simple spatial filtering routine for the cosmetic removal of scan-line noise from LANDSAT TM P-Tape imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 55 (3), 327–331.
- GANGKOFNER, U. & HOLCOMB, D., 2008: HP Resolution Merge. In: ERDAS IMAGINE Help, Leica Geosystems Geospatial Imaging, LLC.
- GONZÁLEZ-AUDICANA, M.; OTAZU, X.; FORS, O. & ALVAREZ-MOZOS, J., 2006: A low computational-cost method to fuse IKONOS images using the spectral response function of its sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(6), 1672–1682.
- HALLADA, W.A. & COX, S., 1983: Image sharpening for mixed spatial and spectral resolution satellite systems. *Proc. of the 17th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 9-13 May, 1023–1032.
- KLONUS, S. & EHLERS, M., 2007: Image fusion using the Ehlers spectral characteristics preserving algorithm. *GIScience and Remote Sensing*, 44(2), 93–116.
- LABEN, C.A., BERNARD, V. & BROWER, W., 2000: Process for enhancing the spatial resolution of multispectral imagery using pan-sharpening. *US Patent* 6,011,875.
- LILLO-SAAVEDRA, M. & GONZALO, C., 2006: Spectral or spatial quality for fused satellite imagery? A trade-off resolution using the wavelet à trous algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, 27, No. 7, 1453–1464.
- OTAZU, X.; GONZÁLEZ-AUDICANA, M.; FORS, O. & NÚÑEZ, J., 2005: Introduction of sensor spectral response into image fusion methods. application to wavelet-based methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(10), 2376-2385.
- SIDDQUI, Y., 2003. The modified IHS method for fusing satellite imagery. *ASPRS 2003 Annual Conference Proceedings*, Anchorage, Alaska (CD Proceedings)
- THIEL, M.; ESCH, T. & DECH, S., 2008. Object oriented detection of settlement areas from Terra SAR-X Data. In: Carsten Jürgens (Ed.), *Remote Sensing - New Challenges of High Resolution*, Proceedings of the EARSeL Joint Workshop Bochum, March 5-7 2008, CD-ROM. pp 242-248
- VRABEL, J.; DORAISWAMY, P.; McMURTREY, J. & STERN, A., 2002, Demonstration of the Accuracy of Improved Resolution Hyperspectral Imagery. *SPIE Symposium Proceedings*, 4725, 556–567.
- WALD, L., 2002: Data fusion - Definitions and architectures - Fusion of images of different spatial resolutions. *École de Mines de Paris*, F.
- WANG, Z.; BOVIK, A. C.; SHEIKH, H. R. & SIMONCELLI, E. P., 2004: Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(4), 600–612.
- WELCH, R. & EHLERS, M., 1987: Merging multiresolution SPOT HRV and Landsat TM data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53, 301–303.
- ZHANG, Y., 2004: System and method for image fusion. *United States Patent* 20040141659.
- ZHOU, J.; CIVCO, D.L. & SILANDER, J.A., 1998: A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data. *International Journal of Remote Sensing*, 19(4), 743–757.

# FRA-SAR 2010 – Analyse von hoch auflösenden SAR Daten in den Tropen, eingebettet in die globale Waldinventur der FAO

RALF KNUTH<sup>1</sup>, ROBERT ECKARDT<sup>2</sup>, NICOLE RICHTER<sup>3</sup>,  
CHRISTIAN THIEL<sup>4</sup> & CHRISTIANE SCHMULLIUS<sup>5</sup>

*Zusammenfassung: Die nächste globale Waldinventur der Vereinten Nationen für das Jahr 2010 wird ergänzend zu den nationalen Forstberichten, anhand einer weltweit systematischen Stichprobe, Fernerkundungsdaten unterstützend auswerten. Landsatdaten aus mehreren Jahrzehnten bilden dabei die Grundlage der Untersuchung. Wegen der nahezu permanenten Wolkenbedeckung in den Tropen reichen diese optischen Satellitenbilder jedoch oft nicht aus, um damit verlässliche Landbedeckungsklassifikationen zu erzielen. Diese Lücken zu füllen ist das Ziel von FRA-SAR 2010. Dazu wird das Potential von sehr hoch auflösenden TerraSAR-X Radar Daten in weltweit 350 tropischen Untersuchungsgebieten genau analysiert. Zusätzlich wird in fünf ausgewählten Untersuchungsregionen die Synergie von X-, C- und vollpolarimetrischen L-Band Daten untersucht werden.*

## 1 Einleitung

Die Erdoberfläche ist zu einem Drittel von Wäldern bedeckt. Diese zeichnen sich durch ihre immense Bedeutung für den Menschen als Rohstoff- und Nahrungslieferant aus und erfüllen vielfältige grundlegende Funktionen in der Natur. So tragen Wälder nicht nur zur Erhaltung der Biodiversität und zum Schutz von Boden und Wasser bei, sondern sind auch eine der Hauptvariablen in der Verringerung des Klimawandels. Deshalb sind aktuelle Informationen über die globalen Forstressourcen für eine nachhaltige Nutzung unabdingbar. Zahlreiche Initiativen zur Waldnutzung bzw. zum Waldschutz richten ihren Fokus auf diese Thematik. Deshalb evaluiert die *Food and Agriculture Organization* (FAO) im Auftrag der Vereinten Nationen, seit bereits 1946, die weltweiten Waldbestände (RIDDER 2007). Das von der FAO für 2010 geplante *Forest Resources Assessment* (FRA) beinhaltet neben den standardmäßig erfassten Waldzustandstabellen für jedes Land eine global angelegte Fernerkundungskampagne.

Wie allgemein bekannt, herrschen über den Tropen hohe bis sehr hohe Wolkenbedeckungsgrade. Deshalb hat sich die FAO dafür entschieden in diesen Regionen zusätzlich zu den optischen

1) Ralf Knuth, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Geographie, Lehrstuhl für Fernerkundung, Löbdergraben 32, D-07743 Jena, Email: [ralf.knuth@uni-jena.de](mailto:ralf.knuth@uni-jena.de)

2) Robert Eckardt, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Geographie, Lehrstuhl für Fernerkundung, Löbdergraben 32, D-07743 Jena, Email: [robert.eckardt@uni-jena.de](mailto:robert.eckardt@uni-jena.de)

3) Nicole Richter, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Geographie, Lehrstuhl für Fernerkundung, Löbdergraben 32, D-07743 Jena, Email: [nicole.richter.3@uni-jena.de](mailto:nicole.richter.3@uni-jena.de)

4) Christian Thiel, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Geographie, Lehrstuhl für Fernerkundung, Löbdergraben 32, D-07743 Jena, Email: [christian.thiel@uni-jena.de](mailto:christian.thiel@uni-jena.de)

5) Christiane Schmullius, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Geographie, Lehrstuhl für Fernerkundung, Löbdergraben 32, D-07743 Jena, Email: [c.schmullius@uni-jena.de](mailto:c.schmullius@uni-jena.de)

Landsatdaten, Radaraufnahmen in die Auswertung zu integrieren. Als aktives Aufnahmesystem ist Radar grundsätzlich unabhängig von anderen Beleuchtungsquellen. Hinzu kommt, dass alle Radarsensoren durch die Verwendung der langwelligen elektromagnetischen Wellen nahezu wetterunabhängig sind. Außerdem ermöglicht die Interaktion dieser Mikrowellen mit einem Objekt Aussagen über dessen physikalischen Eigenschaften. Insbesondere lassen sich Rückschlüsse über die Geometrie und die dielektrischen Eigenschaften ziehen. Konsequenterweise bietet Radar eine solide Datengrundlage, um damit in den permanent bewölkten Tropen Informationen über die Landbedeckung zu sammeln.

## 2 Globale Fernerkundungsstudie der FAO

Alle fünf bis zehn Jahre publiziert die FAO eine aktuelle globale Waldinventarisierung, bzw. einen globalen Waldzustandsbericht. Diese Veröffentlichung findet stets sehr großen Widerhall sowohl auf Seiten der interessierten Öffentlichkeit und Politik, als auch in der Wissenschaft. Dennoch musste die FAO in ihren Waldzustandsberichten immer wieder selbstkritisch feststellen, dass die erhobenen Forstdaten zwar aus nationalen Statistiken und Inventurberichten der individuellen Länder kommen, es jedoch trotzdem zu Ungenauigkeiten bei der Aggregation der Daten kommt. Mögliche Ursachen werden in den unterschiedlichen statistischen Methoden und Definitionen bei der Datenerhebung von den individuellen Staaten gesehen. Gleichwohl betont die FAO das zwar stets entsprechende Anpassungskorrekturen durchgeführt würden, allerdings immer noch eine gewisse Restunsicherheit hinsichtlich der berichteten Zahlen bestehen bleibt. Dies gilt insbesondere für die anthropogenen induzierten Veränderungsraten der Landbedeckung und die Erfassung der natürlichen Landoberflächendynamik (FAO 2000).

Besonders vor dem Hintergrund zukünftige Waldzustandsberichte effizient, operationell und einheitlich zu gestalten, beschloss die FAO eine Fernerkundungsstudie für den nächsten globalen Waldzustandsbericht für das Jahr 2010 zu implementieren. In diesem Zusammenhang bieten Fernerkundungsdaten die Möglichkeit Forstinformationen großräumig, standardisiert und kontinuierlich aufzuzeichnen. Deshalb ist diese einheitliche Methode ein bedeutender Schritt hin zu einer Datenharmonisierung. Schließlich lassen sich dann aus diesen Daten auch die dringend notwendigen Parameter über die Vegetationsdynamik und die Veränderungsraten der Ausdehnung der weltweiten Waldgebiete verlässlich ableiten.

Wohl hauptsächlich aus Kosten und Zeitgründen wird der so genannte *Remote Sensing Survey* (RSS) für 2010 anhand einer globalen systematischen Stichprobe durchgeführt. Dazu werden an jedem Längen- und Breitengradschnittpunkt über Land, in einem 20 km<sup>2</sup> umfassenden Quadrat, Landsatdaten ausgewertet (s. Abb. 1). Im Zeitraum von 1975 bis 2005 aufgezeichnet, bringt die Auswertung dieser enormen Landsat Datenbankgrundlage dennoch Probleme in einigen tropischen Regionen auf Grund der zum Teil permanenten Wolkenbedeckung (vgl. Abb. 2). Um eine Überrepräsentation nördlicher Gebiete zu vermeiden wird ab dem sechzigsten Breitengrad nur noch jeder zweite Schnittpunkt ausgewählt. Jenseits von 84° N bzw. 56° S ist auf Grund des Vegetationsmangels gar kein Untersuchungsgebiet innerhalb des RSS vorgesehen.

Bei der Vorstellung der Fernerkundungsstudie im März 2008 in Rom legte die FAO sehr großen Wert darauf, vor allem den ergänzenden Mehrwerteffect der gesamten Studie hervorzuheben. Allerdings mit Blick auf ein auslaufendes Kyoto-Abkommen und im Hinblick auf die bereits

begonnenen Vorverhandlungen für eine neue Klimakonvention, haben Fernerkundungsdaten in einer solchen Studie durchaus das Potential für die Begutachtung und Validierung der in nationaler Eigenregie erhobenen Daten zu dienen.

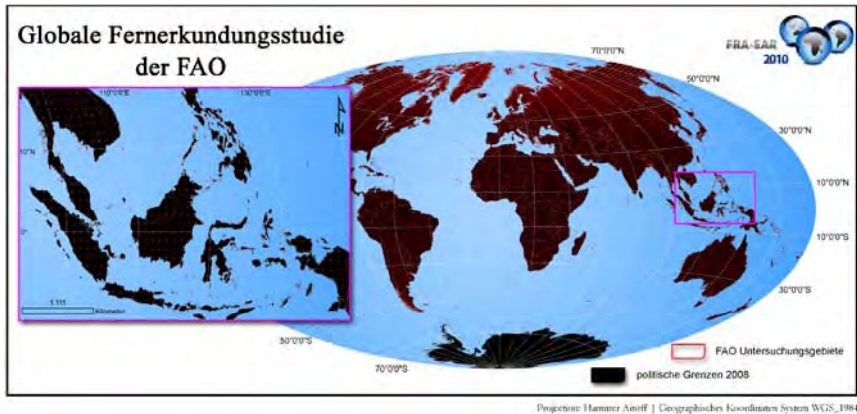


Abb. 1: Untersuchungsgebiete für die Fernerkundungsstudie des RSS für die Waldinventarisierung 2010 der FAO, insgesamt ergeben sich über 13.000 Untersuchungsflächen. Im linken Teil der Abbildung zeigt der vergrößerte Ausschnitt die systematische Stickprobennahme anhand der sich das regelmäßige Muster über Indonesien durchpaust.

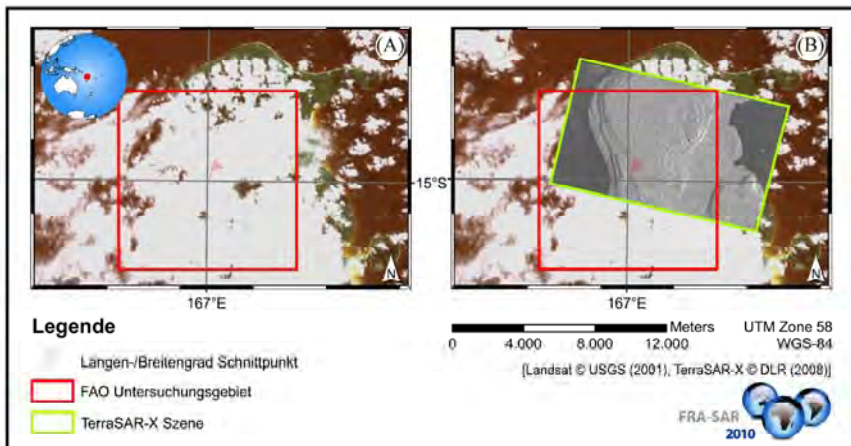


Abb. 2: Vergleich eines Ausschnitts einer optischen Landsat (A) Aufnahme und einer TerraSAR-X Szene (B) aufgezeichnet über Espiritu Santo, Inselrepublik Vanuatu.



### 3 FRA-SAR 2010 Projektbeschreibung

Erstmalig in der Geschichte der geowissenschaftlichen Fernerkundung stehen seit 2008 mit TerraSAR-X geometrisch hoch aufgelöste SAR-Daten aus dem All operationell zur Verfügung. Mit ihrer besten geometrischen Auflösung von ungefähr einem Meter (vgl. Tab. 1) haben TerraSAR-X Daten nahezu die gleiche Qualität wie Luftbildaufnahmen, wodurch sich der satellitengestützten Waldkartierung neue Perspektiven eröffnen und gleichzeitig neue Anforderungen an routinemäßige Bildinterpretation entstehen.

Mit Projektbeginn im März 2008 betritt FRA-SAR 2010, im Rahmen der Einbindung in die weltweite Fernerkundungsstudie der FAO für die für 2010 geplante globale Waldinventur, wissenschaftlich herausforderndes und technisch aussichtsreiches Neuland, indem es sich zum Ziel gesetzt hat, das Potenzial dieser hoch aufgelösten SAR-Daten innerhalb der Tropen zu untersuchen. Gefördert vom Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR) und unterstützt durch die Mitarbeit der FAO werden insbesondere die wolkenbedeckten Gebiete des RSS im Focus der Projektforschung liegen.

Tab. 1: TerraSAR-X ausgewählte Instrument Parameter und Aufnahme Modi

Mode	Stripmap	High Resolution Spotlight Mode	Spotlight Mode	ScanSAR
Frequenz	9,65 GHz			
Einfallswinkel	20°-45°	20°-55°	20°-55°	20°-45°
Polarisation	HH od. VV (single); HH/VV, HH/HV, VV/VH (dual)	HH od. VV (single); HH/VV (dual)	HH od. VV (single); HH/VV (dual)	HH od. VV
Azimut Auflösung	3,3 m (single); 6,6 m (dual)	1,1 m (single); 2,2 m (dual)	1,7 m (single); 3,4 m (dual)	18,5 m
Ground Range Auflösung	1,7 m – 3,49 m	1,48 m – 3,49 m (0,74 m – 1,77 m bei 300 MHz Bandbreite)	1,48 -3,49 m	1,7 m – 3,49 m
Footprint (azimuth mal range)	50 km mal 30 km (single); 50 km mal 15 km (dual)	5 km mal 10 km	10 km mal 10 km	100 km mal 150 km

#### 3.1 Auswahl der FRA-SAR 2010 Untersuchungsgebiete

Insgesamt sind für das FRA-SAR 2010 Projekt 350 TerraSAR-X High Resolution Spotlight Szenen innerhalb der Tropen vorgesehen. Das entscheidende Kriterium für die Auswahl eines

Untersuchungsgebiets ist ein hoher Wolkenbedeckungsgrad. Ausgehend von den Informationen einer Studie von JU & ROY (2008), über den Wolkenbedeckungsgrad für das Jahr 2002 in Landsat ETM+ Daten, konnten entsprechend 1.238 potentielle Versuchsflächen aus dem gesamten RSS Stichprobenumfang abgeleitet werden. Um einen maximalen Informationsgewinn für alle 350 TerraSAR-X Szenen zu erzielen wurde ein Ranking unter allen potentiellen Flächen unter zuhilfenahme von zusätzlichen Daten eingeführt. Diese Gewichtung stellt sicher, dass jede einzelne der 1.238 Testflächen (a) eine möglichst heterogene Landbedeckung aufweist; (b) einen hohen Waldanteil hat; (c) eine hohe Landnutzungsänderungsrate hat; (d) vom *Joint Research Center* (JRC) der EU als Problemgebiet für die optische Fernerkundung explizit eingestuft wurde; (e) möglichst mehr Ökozonen beinhaltet und (f) ein geringes Relief aufweist. Schließlich wurde bei der Auswahl auch sehr großer Wert darauf gelegt, solche SAR-Szenen zu bestellen, wo prinzipiell die Möglichkeit besteht diese mit Bodeninformationen abzugleichen. Dazu wurden zahlreichen Wissenschaftler, Institute und Nichtregierungsorganisationen angeschrieben und um deren Mithilfe gebeten. Abbildung 3 zeigt alle 350 FRA-SAR 2010 Untersuchungsgebiete. In rot dargestellt sind 50 Szenen anhand derer eine Methodik nach Vorgaben FAO zur Klassifikation entwickelt werden wird. Sie wurden so ausgewählt, dass sie die weltweit unterschiedlichen Landoberflächen bzw. Landnutzungen möglichst gut repräsentieren. Infolgedessen kann die entwickelte Methode auf die verbleibenden 300 Aufnahmen anschließend übertragen werden kann.

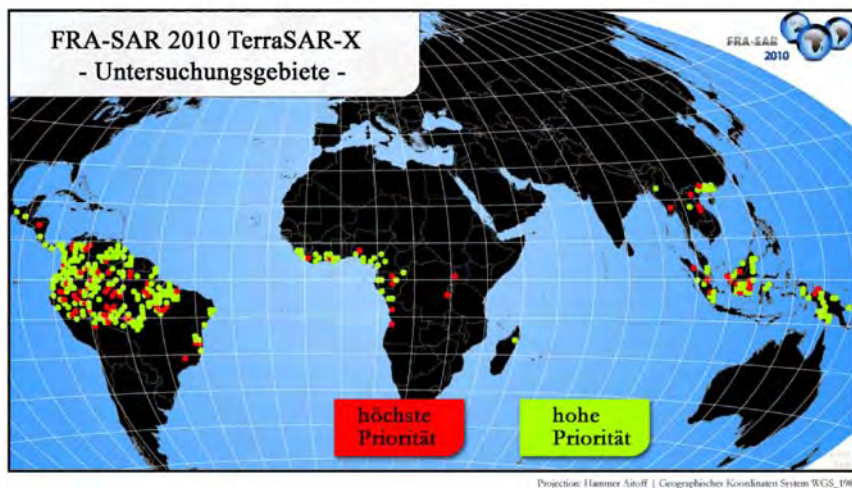


Abb. 3: FRA-SAR 2010 Untersuchungsgebiete; rot sind all jene Gebiete anhand derer eine Methodik zur Klassifizierung entwickelt wird, welche dann auf die in grün dargestellten Gebiete übertragen werden soll

Zusätzlich zur Auswertung der TerraSAR-X Daten werden an weltweit fünf sogenannten Supersites C- und vollpolarimetrische L-Band Daten analysiert. Die komplexen frequenzabhängigen Rückstreumechanismen der Landoberfläche sind zentraler Bestandteil

dieser Auswertung und können folglich das Synergiepotential der verschiedenen Radarsensoren umfassender begutachten.

Demzufolge liegt der Schwerpunkt aller Forschungsanstrengungen bis zum Projektende 2011 auf der Entwicklung von Bildverbesserungsalgorithmen und der Informationsextraktion, durch den Einsatz multivariater Bildverarbeitungsanalysen der multifrequenten SAR-Daten.

### 3.2 Gegenwärtige Analysen

Zurzeit befindet sich die TerraSAR-X Datenbank im Aufbau, da noch nicht von allen ausgewählten Gebieten TerraSAR-X High Resolution Spotlight Daten existieren und somit erst aufgezeichnet werden müssen. Sämtliche vorhandene SLC-Datensätze wurden zunächst mit SRTM-Geländedaten georeferenziert und topographisch normalisiert. Dabei hat sich mitunter gezeigt, dass die SRTM-Daten nur bedingt tauglich für die Georeferenzierung mit den geometrisch sehr hoch aufgelösten X-Band sind. Diesbezüglich sollen zukünftige Analysen zeigen ob die derzeitige Hypothese, dass X-Band in vegetationsreichen Gebieten ausschließlich mit der Oberfläche interagiert und somit nur bedingt mit den SRTM-Geländedaten korreliert, sich bestätigt.

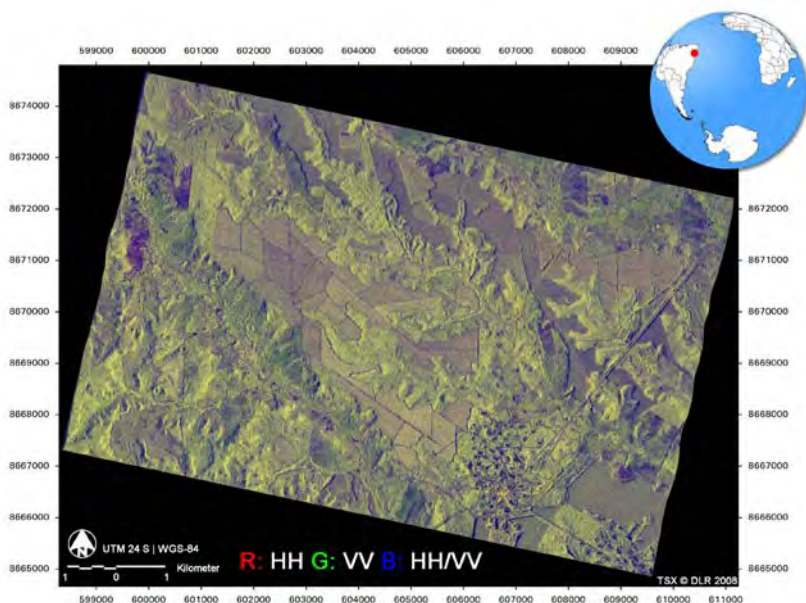


Abb. 4: TerraSAR-X High Resolution Spotlight Szene

Abbildung 4 soll exemplarisch den potentiellen Informationsgehalt anhand einer TerraSAR-X High Resolution Spotlight Aufnahme im wolkenreichen Osten von Brasilien visuell unterstreichen. Insbesondere im zentralen und nordwestlichen Teil der Szene lassen sich

landwirtschaftliche Nutzflächen umgeben von Waldgebieten sehr leicht in der Farbkomposite erkennen. Ein wichtiges Teilziel der FRA-SAR 2010 Analysen ist es diese Strukturen automatisiert anhand von Texturmaßen und Segmentierungsalgorithmen zu gemäß FAO Vorgaben zu klassifizieren.

### **3.3 Geplante Ergebnisse für FRA-SAR 2010**

Das übergeordnete Gesamtziel von FRA-SAR 2010 ist die Entwicklung einer mehrstufigen Auswertemethodik auf Basis der TerraSAR-X Daten, um nationale und überregionale Waldinventuren zu verbessern. Resultierend aus der Dateninterpretation entstehen Waldbedeckungs- bzw. Waldnutzungskarten, gemäß den FRA-Schlüsselanforderungen der FAO. Darüber hinaus ist die Entwicklung von validierten und operationellen Bildverarbeitungs- und Interpretationsketten vorgesehen. Zur Unterstützung von nationalen Organisationen und lokalen Forstexperten werden Anwenderhandbücher und Trainingskapazitäten geschaffen. Während die Entwicklung der technischen Grundlagen durch die FSU Jena erfolgt, wird die FAO die Methodik umsetzen und Teile der Validierung übernehmen. Eine Industrie einbindung der resultierenden Prozessketten und die Adaption der Produkte an gegebene Nutzeranforderungen sind ebenfalls durch das Projektpartnerunternehmen GAF AG vorgesehen.

## **4 Danksagung**

FRA-SAR 2010 wird vom Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrum unter dem Förderkennzeichen 50EE0802 finanziert, dafür möchten sich die Autoren bedanken.

## **5 Literaturverzeichnis**

- FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION, 2000: Global Forest Resources Assessment 2000. Online verfügbar unter: <<http://www.fao.org/docrep/004/y1997e/y1997e1f.htm>>.
- JU, J. & ROY, P., 2008: The availability of cloud-free Landsat ETM+ data over the conterminous United States and globally. *Remote Sensing of the Environment*, **112**, S. 1196–1211.
- RIDDER, R. , 2007: Global Forest Resources Assessment 2010 – Options and Recommendations for a Global Remote Sensing Survey of Forests. FAO Working Paper 141.



## Extraction of forest parameter from laser data

BARBARA KOCH<sup>1</sup>, JOHANNES HEINZEL<sup>2</sup>, SANDEEP GUPTA<sup>3</sup>  
YUNSHENG WANG<sup>4</sup> & HOLGER WEINACKER<sup>5</sup>

*Zusammenfassung: Die Erfassung und Abgrenzung von Einzelbäumen ist in dichten Waldbeständen und in Laubbaumbeständen immer noch mit großen Fehlern behaftet. Es gibt zwar eine Reihe von Untersuchungen, die eine hohe Erfolgsquote bei der Erfassung von Einzelbäumen dokumentieren, aber die meisten dieser Untersuchungen beziehen sich auf hiebsreife Bestände, die relativ einfache Bestandesgeometrien aufweisen. Der größte Teil der erfolgreichen Untersuchungen bezieht sich auf Nadelwaldreinbestände mit einer mehr offenen und einschichtigen Bestandesstruktur, wie sie häufig in den nördlichen Breiten vorkommen. Das Hauptproblem mit den Ansätzen, die für bestimmte Waldtypen entwickelt wurden, ist deren Übertragbarkeit auf verschiedenen Waldtypen mit unterschiedlich komplexen Bestandesgeometrien. Ein Verfahren bei der Einzelbaumdelineierung, welches auf verschiedene Bestandestypen übertragen werden kann und dabei gleich bleibend hohe Qualität bei der Erfassung der dominanten Baumarten erzeugt, würde die Anwendbarkeit von flugzeuggetragenen Laserdaten deutlich erhöhen. In diesem Artikel werden deshalb verschiedene Ansätze vorgestellt, welche eine höhere Übertragbarkeit und eine bessere Qualität bei der Einzelkronendelineierung, in komplexen Bestandesstrukturen versprechen. Die Ansätze wurden mit first und last pulse Daten durchgeführt. Sie setzen auf 2D Modelldaten als auch auf 3D Rohdaten auf. Erste Qualitätsanalysen zeigen Genauigkeiten zwischen 49% und 88%.*

### 1 Introduction

In the last decade the use of LiDAR data has tremendously increased for various applications. There are different pulsed airborne laser system types on the market. These are the first and last pulse systems on the one end and the full wave systems on the other end. In between there exist multiple pulse systems. The full waveform data from latest laser scanners are capable of giving more information as compared to the traditional first and last pulse ones. The multiple return pulses from a single emitted laser pulse with additional information like amplitude and pulse width besides the three-dimensional coordinates has become a relevant information for the user community for gathering a quality information from the data source. In past a lot of work has been done in the application of airborne laser scanner data from first and last pulse systems and there are also some investigations on full wave systems for forest related information extraction (J. HYYPÄ et al., 2006; PERSSON et al., 2006.). For single tree extraction different data sources are used. The main types are aerial photographs, which are used since the first attempts (BRANDTBERG & WALTER 1998, WANG et al. 2004, LECKIE et al. 2005) and LiDAR data. LiDAR based methods differ by the use of simple first and last pulse (PERSSON et al. 2002, KOCH et al. 2006) and the more capacious full waveform data (REITBERGER et al. 2007, WANG et al. 2008).

<sup>12345</sup>) Albert Ludwigs-University of Freiburg Remote Sensing and Landscape Information Systems  
FeLis

Often 2-D delineations of the tree crowns were applied. In comparison with three-dimensional methods 2-D algorithms don't have a need for full-waveform data and run on nDSMs (normalized Digital Surface Models). From the lower amount of data an advantageous processing time leads to a better applicability for large areas. Trees are delineated according to the features of crowns on the nDSM, thus the individual trees in the lower canopy layer whose crowns are covered by the top canopy layer cannot be detected. Since the fraction of those covered trees is restricted to not more than 3 % of the whole timber volume in a temperate forest (HILDEBRANDT 1996), the extraction of dominant trees is sufficient for several purposes. The 2-D model based approaches are based on extracting the local maxima as tree tops from the nDSM. These are then used as seed points for a variety of region growing procedures like the common watershed algorithm. It is known that the most difficult problem is the correct smoothing of the nDSM in the forefield, which is necessary because in general a tree crown consists of more than one local maximum. Since the optimal smoothing depends on the crown size it was approximated by the tree height in an earlier study (KOCH et al. 2006). Of course this forces numerous failures as the correlation doesn't work in several cases (WEINACKER et al. 2004).

However within the last time more and more raw data are used for single tree delineation. Based on raw data a complete 3-D model of the whole tree is extracted. With full wave data the 3-D model approaches can be decisively improved due to the more information. There are approaches by WANG et al. (2007) and MORS DORF et al. (2003). The latter used the relatively rare clustering approach.

This paper will describe three different approaches to extract single tree crowns from first and last pulse data. All approaches intent to improve the transferability of the methods between different stand types combined with a better success rate. The three methods follow different entries. One method is based on the 2-D model based approach but improves this approach by a so called 'prior knowledge based single tree extraction' concept. This concept integrates optical data and LiDAR data for the single tree delineation. The second approach is based on raw data and uses a voxel based 3-D modeling approach. The third concept uses also the raw data but the delineation and modeling of trees is based on a clustering approach. All three concepts will be shortly described and the results will be presented.

## 2 Methodological approach

As indicated in the introduction there have been three different approaches tested in order to improve the single tree delineation without pre-knowledge. Objective was to develop methods which are transferable to different stand types and will not have to be adapted each time to the specific stand conditions. One method is a 2-D model based approach while the two other algorithms are 3-D methods based on raw data.

### 2.1 Study area and data

There are two test areas for the development and testing of the algorithms. One is located in the forest district Milicz in Poland. The area is stocked with pine (*Pinus sylvestris*), oak (*Quercus petraea*) and hornbeam (*Carpinus betulus*) stands of different age. Some areas are also mixed stands of pine and broadleaf trees. For the Poland test site a high number of sample plots have been measured. For sample plots in pine stands and oak/beech stands tree foot co-ordinates and

the tree height has been measured in the field. For the study area in Poland data from the Falcon II system from Toposys GmbH have been recorded with the opto-electronic first and last pulse LiDAR and the RGB/NIR line scanner. The data have been captured on 2-3 of May 2007 with trees being in full on leaf state. The average point density was 7 points per sqm and the ortho-images had a resolution of 25cm.

The second study area is located in the Rhine valley near Karlsruhe, Germany and the main tree species are pine (*Pinus sylvestris*), oak (*Quercus petraea* and *Quercus rubra*) and beech (*Fagus sylvatica*) stands. The old stands are more complex multi-layer stands. The area was flown with a full wave laser system (Harrier 56, Riegl LMS-QW560 scanner.) mounted on a helicopter in August 2007 by the Toposys GmbH and with the Falcon II system from TopoSys® GmbH on July the 1<sup>st</sup> 2008. In addition RGB/NIR images were recorded in July 2008 with the digital line scanner. The RGB/Nir images were used as reference data. For the test site enterprise inventory plots are available in a raster 100 x 200 m. Each plot has a maximum radius of 12m. No coordinates of the tree foot or crown perimeter are available but the top height and the DBH.

## 2.2 Improved 2-D single tree delineation

The method is based on two steps which are described in detailed in HEINZEL et al. (2009). In the following the main features are summarized. First the crown size is classified pixel based for the area under investigation. These class sizes are input for the smoothing of the nDSM and the single tree algorithm. The method used for the crown size classification is based on greyscale granulometry which is a complex algorithm using the basic morphological opening operator. Mathematical morphology analyses the shape of objects by the two fundamental operations erosion and dilation. For grey scale images erosion and dilation refer to the minimum and maximum of grey values within a centered and flat structuring element. Certain combinations of erosion and dilation make up the opening and closing operators. Granulometry is a method for texture measurement and classification and builds on a sequence of opening transformations with increasing structuring elements. During the granulometric procedure local classifications are achieved by centering a window around each pixel of the image and calculating the dominant size class within this. The use of granulometry for single tree related applications in aerial photogrammetry is rather unexplored. The only study is provided by SOILLE (2002) which was focused on simple homogenous stand situations. Due to the complex surface structure and irregular form of forest trees the granulometry method has to be expanded and adapted. Adaptions are made to the kind and the preprocessing of the input data, the class border exactness on highly heterogeneous forest textures and the reduced program runtime for practical application.

To meet the requirements for an improved granulometry method first the RGB/NIR images have been transformed into IHS images and the intensity information was extracted. Second a stepwise procedure was applied which adapts the window size to the observed crown sizes to minimize the failure concerning the influence of larger neighbor crowns. Third an outer loop is implemented to assign the size classes in ascending order (Fig. 1).



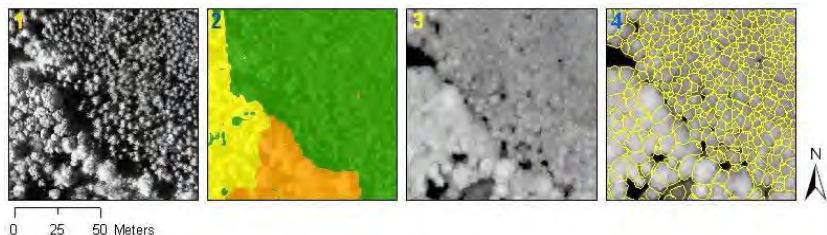


Fig. 1: Steps of the 2D delineation on an subset of the Polish site. Image 1 shows the intensity channel as input for the crown size classification in image 2. The size class is criterion for adaptive smoothing of the nDSM in image 3 on which the delineation algorithm is run in image 4.

The results of the crown size classification are then input to the second step of the method, the automatic single tree delineation. The delineation is based on two main procedures the pouring and the ray algorithm (KOCH et al. 2006). For all 2-D model based approaches a smoothing is needed in order to get relevant segmentations. In this method the smoothing factor is not as in former approaches based on height information with the assumption that higher trees have larger crowns but is based on the crown size classes which have been calculated based on the granulometry method. The granulometry image is then input for the smoothing of the nDSM while the width of the Gauss filter is calculated individually for each crown size class. On the smoothed nDSM the pouring and the ray algorithm to delineate single trees are then executed with an iterative extraction of trees according to their crown sizes from small to large.

### 2.3 3-D single tree crown detections based on modified *k*-means algorithm

From definition, clustering in pattern recognition is the process of partitioning a set of pattern vectors into subsets called clusters. For e.g. if the pattern vectors are pairs of real numbers which can be viewed as points, clustering consist of finding subsets of points that are 'closed' to each other in Euclidian 2-D or 3-D space. There are several types of clustering algorithms that have been found useful in image segmentation and partitioning of clusters. For tree crown separation a clustering based methodology was applied for the 3-D raw point clouds through iterative partitioning based approach - modified *k*-means.

The normal *k*-means algorithm is an iterative hill-climbing method and well in practice and is a staple of clustering methods. The *k*-means method is numerical, unsupervised, non-deterministic and iterative. The objective is to minimize total intra-cluster variance, or, the squared error function. Here, in this algorithm the  $\Phi$  or buoys is minimized, sum of absolute differences between each point and its closest center. Here, each centroid is the component-wise median of the points in that cluster. It simply can be expressed in the following equation as below:

$$V = \sum_{i=1}^k \sum_{x_j \in S_i} |x_j - \mu_i|^2$$

where there are  $k$  clusters  $S_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$  and  $\mu_i$  is the centroid or mean point of all the points . The modified *k*-means algorithms differs from the normal *k*-means in a sense that it uses local

maxima as an external seed point as an input to initialize the clustering process and partitioning the individual clusters, combine with some mathematical reasoning like calculating the distance in Euclidian 3-D space between each of the extracted local maxima point with respect to the rest of the local maxima points and setting a threshold distance based upon which seed points are selected for the automatic extraction of single 3-D tree crowns. By scaling down the height value of all the seed points and data points before initializing the process the points come close to each other and the clustering becomes easier. Computational complexity of the algorithm is  $O(ndcT)$  where  $n$  is the number of d-dimensional pattern,  $d$  is the number of features,  $c$  is the assumed number of clusters and  $T$  is the number of iterations.

After tree delineation based on the clustering the 3-D reconstruction of clusters representing the individual tree crown is carried out. This has been done using the QHull algorithm. Qhull implements the Quickhull algorithm for convex hulls. This algorithm combines the 2-d Quickhull algorithm with the n-d beneath-beyond algorithm. The main advantages of Quickhull are output sensitive performance (in terms of the number of extreme points), reduced space requirements, and floating-point error handling. So, each tree crown is shown as a 3-D object with triangular surface in the case of 3-D convex polytope (Fig. 2). Those cluster are discarded in order to reconstruct the polytope.

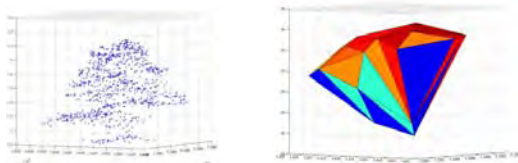
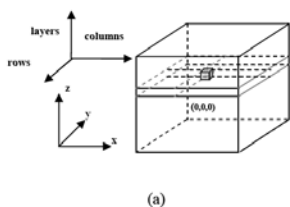


Fig. 2: Convex polytopes generated by using 3-D convex hull algorithm from clusters obtained from modified  $k$ -means method.



$$M = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} & 0 & 0 & -\frac{x_0}{r} \\ 0 & -\frac{1}{r} & 0 & \frac{y_0}{r} \\ 0 & 0 & \frac{1}{t} & 0 \end{bmatrix}$$

Fig. 3: (a) Local voxel space with real world coordinate system ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) and voxel coordinate system (rows, columns, layers); (b) Definition of transformation matrix  $M$ .

## 2.4 3-D single crown detection based on vertical structure canopy analysis

The method is comprehensively described by WANG et al. (2008) and will only be briefly reviewed. The 3-D crown delineation is based on raw data. All the raw data of the area are divided into grid cells and with the grid cells a local voxel space is defined to describe the 3D spatial features of the normalized raw points. All the normalized points within the grid cells are remapped into the voxel space Fig. 3.

For each normalized point in real world  $P(x,y,z)$ , there is a correspondent point in voxel space  $P'(row, column, layer)$ . According to the density of raw point cloud and the scale of  $r$  and  $t$  in transformation matrix  $M$ , it is possible that several normalized points are located inside a same voxel. To simplify the computational complexity, a series of 2D horizontal projection images are introduced into the further analyses as an instrument to record the voxel space. Taking all the voxels of a single layer out of the voxel space, the voxels of the layer can be regarded as pixels of an image. The number of normalized points within each voxel is marked as a gray value of the correspondent pixel in the image. A 2-D horizontal projection image of the selected layer is then generated. Points of each individual tree crown will present a cluster feature on the horizontal projection image. The presence of the cluster features is highly related to the horizontal resolution  $r$  and the thickness  $t$  of the voxel space. The values of parameter  $r$  and  $t$  in transformation matrix  $M$  rely on the density of the raw point cloud. According to our experiments, a horizontal resolution of 0.5 meter and a thickness of 1 meter are the ideal values for dataset with 5~12 points per  $m^2$ .

The delineation of the single tree crowns is based on the horizontal projection image at each layer represent the distribution of tree crowns in the correspondent height level. The basic concept of single tree extraction is to trace the presence of crown outlines on the projection images from top to bottom through projected images at the different height levels. Potential tree crown contours in each layer are delineated based on the cluster features on the correspondent projection image. A hierarchical morphological opening and closing process with a group of predefined structuring elements is performed Fig. 4.

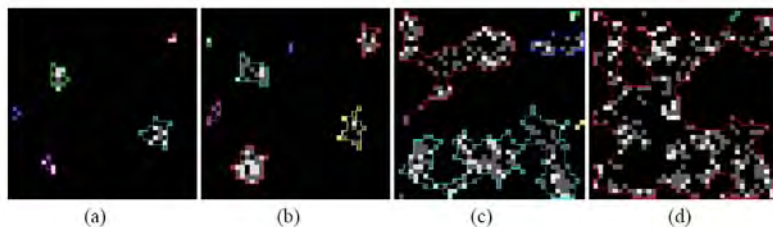


Fig. 4: hierarchical morphological based crown contour extraction at different height level (a) 39m, (b) 38m, (c) 36m and (d) 35m

While at top crown layer the delineation of the single crown contours are easy the situations turn to be challenging when the process goes to lower layers since crowns are not solid with LiDAR points and neighboring crowns conjunct. To solve this problem an improvement of the hierarchical morphological algorithm is necessary. In order to do so a simulation of pouring is included in the tree crown contour delineation process. The crown contours from the upper layer is expended according to the cluster features on the projection image, the enlargement is stopped when the neighboring regions conjunct. The hierarchical morphological algorithm is parallel implemented inside and outside the enlarged reference regions.

In the final delineation step tree crown regions on the layers at the different height levels are considered as nodes at different levels of a forest data structure. The prime root node is the crown region on the top layer. A pre-order forest traversal process is fulfilled to visit all the crown regions of the forest. Individual tree crowns are extracted during the forest traversal

process by grouping the vertical neighboring crown contours from layers at the different height levels (Fig. 5).

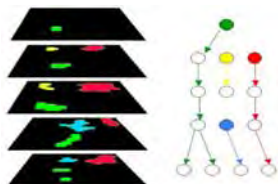


Fig. 5: Demonstration of single tree extraction during a pre-order forest traversal process

Each detected tree crown is described by an array of 2D tree crown regions in different layers at the different height levels. Since the layers in voxel space have certain thickness, 3D prisms can be constructed for the 2D crown regions in different layers with the thickness of layers as the height of the prisms. A prismatic 3D crown model finally can be reconstructed by a combination of all the crown prisms at the different height levels.

### 3 Results

The verification of the different approaches in single tree delineations is based on two different validation methods and two different test sites. The 2-D delineation algorithm was validated based on the crown delineations in aerial photographs and the validation was carried out on the Karlsruhe test site, Germany. The 3-D raw data based single tree delineations are based on top tree identifications and reference is terrestrial measurements at the Polish test site. The different validation processes in different sites do not allow a direct comparison of the results. However in order to get a first impression on the performance of the different approaches results are presented for similar stand situations. The validation summarizes the results of two different quality classes, the class “perfect match” and the class “good match”. As “perfect match” crowns and tree tops are considered which show a perfect match to the reference crowns while as “good match” those crowns and tree tops are comprised which are shifted against the reference crowns but can be clearly assigned to one reference crown. For the crown delineation this means a crown overlap less than 50% while for the tree top match these are tree tops which at the same height level nearby a measured tree crown (may fall outside of the crown), and the distance between the measured tree top and the automatically detected tree top points is between 3m-5m (Fig. 6).

The presentation of the results show that all methods deliver good results for broadleaf tree stands as well as for conifer stands. The percent of correctly assessed tree crowns is for all methods within the described percentage of other authors (Fig. 7 to 9).

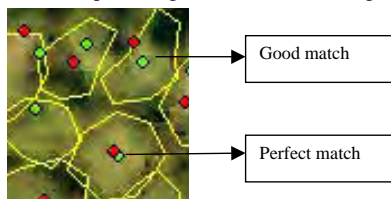


Fig. 6: Example for the quality classes of the tree top match

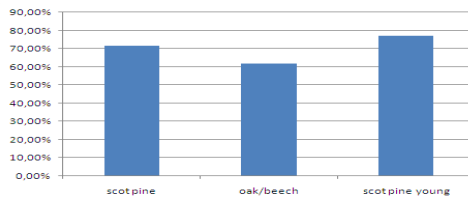


Fig. 7: 2-D delineation results at Karlsruhe test site

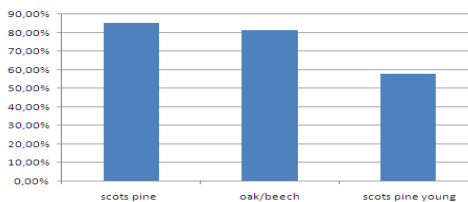


Fig. 8: 3-D tree detection based on the *k*-means algorithm at the Polish test site

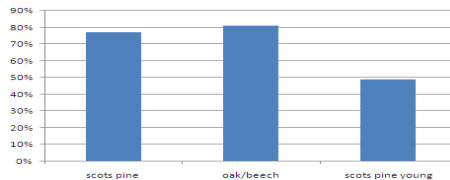


Fig. 9: 3-D tree detection based on the vertical structure algorithm

A clear difference between the methods can be observed for the young scots pine stands. The 2-D algorithm shows a remarkable high accuracy compared to the young scots pine stand assessed by the 3-D algorithms. This might be partly due to the fact that the young scots pine stands are not identical for the 2-D and 3-D approach. Assessing nearly 80% in a young scot pine stand however shows that the 2-D algorithm with smoothing adaption works quite well in uniform stands. The 50% and 60% for the 3-D algorithms are disappointing. For a final conclusion tests on the same site with an identical valuation method is needed. For the old stands 3-D algorithms seem to work quite well with nearly 80% or above 80% of assessed trees. It can be concluded that the 3-D algorithm works quite well in old conifer as well as broadleaf stands. For the 2-D delineation the results are of lower quality. However the stand situation in Karlsruhe is more complex with different vertical layers. For an final assessment validations in the same test sites are needed. However the results indicate that for the model based 2-D algorithms limitations in stands which have complex vertical structures exist.

## 4 Discussion and outlook

The paper presents different approaches for single tree delineation. All approaches have given good results. However it has to be mentioned that a direct comparison of the methods is not possible due to the different test sites and validation processes. The main problem in many investigations is the availability of correct terrestrial reference data. This was also true for this investigation. The validation of the terrestrial data showed that the positioning of reference data was erroneous. While this could be corrected for the Poland site no correction was possible for the Karlsruhe site. The main problem is that terrestrial measurements often have inexact coordinates because GPS measurements in the forest are erroneous. In addition for the Karlsruhe site no references to single tree positions exist therefore the reference is based on crown delineation from aerial photographs. This reference base seems acceptable for 2-D model based algorithms due to the fact that in both data sets similar crown situations are assessed. While for the 3-D algorithms also suppressed trees will be identified, therefore only terrestrial measurements should be used for validation.

The first results seem to indicate that 2-D delineation algorithms always will miss more trees if there are more layers in a stand. However the major advantage of the 2-D algorithm is the fast computing time. Combined with new approach which automatically adapts smoothing to the crown sizes the applicability for large areas increases. The 3-D algorithms are very computing intensive and need a higher number of laser points per sqm to come up with good results in young stands. However they seem to have high potential especially in multi-layered and mixed stands.

All algorithms are not yet in the state for a practical application over large areas. In general all approaches presented are in a research state. Providing an assessment on the practicability of the algorithms more different stand situations need to be investigated. For a direct comparison the use of the same LiDAR data set and reference information is needed. Within the next time it is planned to apply the 2-D method also at the Polish test site. More reference sites will be measured to compare the different algorithms for different stand situations. Finally investigations are on the way to compare first and last pulse with full wave data on the Karlsruhe site. Especially for the 3-D methods an increased performance is expected by use of full wave information.

## 5 Literaturverzeichnis

- BRANDTBERG, T. & WALTER, F., 1998: Automated delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images by multiple-scale analysis. *Machine Vision and Applications*, **11**, pp. 64-73.
- HEINZEL, J.; WEINACKER, H. & KOCH, B., 2009: Prior knowledge based single tree extraction. Submitted to: *International Journal of Remote Sensing*.
- HILDEBRANDT, G., 1996: *Fernerkundung und Luftbildmessung* (Heidelberg, Germany: Wichmann).
- HYYPÄ, J.; YU, X.; HYYPÄ, H. & MALTAMO, M., 2006: Methods of Airborne Laser Scanning for forest information extraction. In: T. Koukal, W. Schneider (Eds.). *Proceedings of*

- International workshop "3D Remote Sensing in Forestry", University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna: 63-78.
- KOCH B.; HEYDER U. & WEINACKER, H., 2006: Detection of individual tree crowns in airborne lidar data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **72**, pp. 357-363.
- LECKIE, D. G.; GOUGEON, F. A.; TINIS, S.; NELSON, T.; BURNETT, C. N. & PARADINE, D., 2005: Automated tree recognition in old growth conifer stands with high resolution digital imagery. *Remote Sensing of Environment*, **94**, pp. 311-326.
- MORSDDORF, F.; MEIER, E.; ALLGÖWER, B. & NÜESCH, D., 2003: Clustering in airborne laser scanning raw data for segmentation of single trees. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol 34, part 3/W13, pp. 27-33.
- PERSSON A.; HOLMGREN J. & SÖDERMAN U., 2006: Identification of tree species of individual trees by combining very high resolution laser data with multi-spectral images, *Proceeding of the International Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry*, Vienna, pp. 91-96.
- PERSSON, Å.; HOLMGREN, J. & SÖDERMANN, U., 2002: Detecting and measuring individual trees using airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **68**, pp. 925-932.
- REITBERGER, J.; KRZYSZEK, P. & STILLA, U., 2007: Combined tree segmentation and stem detection using full waveform LiDAR data. In *Proceedings of the ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*, Espoo, Finland, 2007, Rönnholm, P., Hyypä, H. and Hyypä, J. (Eds.), **36**, pp. 332-337.
- SOILLE, P., 2002: Morphological texture analysis: An introduction. In *Lecture notes in physics*, Mecke, K. R. and Stoyan, D. (Eds), **600**, pp. 215-237 (Berlin Heidelberg, Germany: Springer-Verlag).
- WANG, L.; GONG, P. & BIGING, G. S., 2004: Individual tree crown delineation and treetop detection in high-spatial-resolution aerial imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **70**, pp. 315-357.
- WANG, Y.; SOH, Y. S. & SCHULTZ, H., 2006: Individual tree crown segmentation in aerial forestry images by mean shift clustering and graph-based cluster merging. *International Journal of Computer Science and Network Security*, **6**, pp. 40-45.
- WANG, Y.; WEINACKER, H. & KOCH, B., 2008: A LIDAR point cloud based procedure for vertical canopy structure analysis and 3D single tree modeling in forest. *Sensors*, **8**, pp. 3938-3951.
- WANG, Y.; WEINACKER, H. & KOCH, B., 2007: Development of a procedure for vertical structure analysis and 3d-single tree extraction within forests based on lidar point cloud, *Proceeding of the ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*, Espoo, Finland. *IAPRS Volume XXXVI, Part 3 / W52*, pp.419-423
- WEINACKER, H.; KOCH, B.; HEYDER, U. & WEINACKER, R., 2004: Development of filtering, segmentation and modeling modules for LiDAR and multispectral data as a fundament of an automatic forest inventory system. In *Proceedings of the ISPRS working group VIII/2, laser-scanner for forest and landscape assessment*, Freiburg, Germany, 2004, Thies, M., Koch, B., Spieker, H. and Weinacker, H. (Eds.), **36**, pp. 50-55.

# First/Last Pulse und Full Waveform Laserscanning zur 3D Kartierung von Wäldern

JOSEF REITBERGER, PETER KRZYSTEK & UWE STILLA

*Zusammenfassung: Der Beitrag stellt aktuelle Forschungsergebnisse zur Einzelbaum-segmentierung und Baumartenklassifikation mit Hilfe von konventionellem First/Last Pulse und Full Waveform Laserscanning vor. Eine neuartige 3D Segmentierung erbringt mit Full Waveform Daten eine deutliche Steigerung der Erkennungsrate von 13%. Die Klassifikationsgenauigkeit von Laub- und Nadelbäumen kann durch Ausnutzung der Full Waveform Information auf 95% gesteigert werden. Die Punktdichte und der Belaubungszustand haben auf die Ergebnisse nur einen geringen Einfluss.*

## 1 Einleitung

Airborne Laserscanning (ALS) hat sich in den letzten 15 Jahren als effizientes Verfahren zur Erfassung und Kartierung der Erdoberfläche entwickelt und schnell ein breites Anwendungsspektrum erreicht. Durch die rasante Entwicklung von elektronischen Bauteilen konnte die Leistungsfähigkeit der Systeme insbesondere im Bereich der Pulsrate und der Messgeschwindigkeit deutlich gesteigert werden (Abb. 1). Neuartige „Multiple Pulses in the Air“-Systeme (ROTH & THOMPSON, 2008) nutzen die erhöhte Pulsrate aus und senden einen neuen Laserpuls aus bevor das reflektierte Signal des vorherigen Laserpulses empfangen wird. Dies ermöglicht eine größere Flughöhe bei gleichem Punktabstand (HUG, 2008). Gleichzeitig führte die Pulsratensteigerung zu einem Zuwachs in der Punktrate und der aufgezeichneten Datenmenge (Abb. 2).

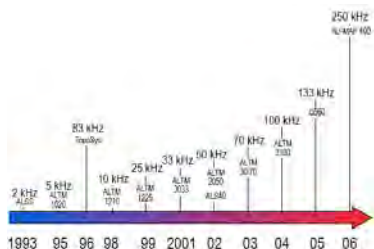


Abb. 1: Effektive Messrate bei ALS (Hug, 2008)

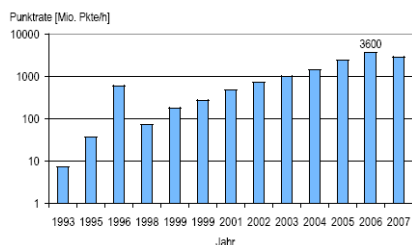


Abb. 2: Datenzuwachsrate bei ALS (Hug, 2008)

Neben der Pulsratensteigerung konnte eine vollständige Aufzeichnung des reflektierten Laserimpulses erreicht werden. Das als Funktion der Aufnahmezeit aufgetragene Signal wird typischerweise Echoprofil oder „Waveform“ genannt. Im Gegensatz zu den konventionellen

- 1) Josef Reitberger, Hochschule München, Karlstr. 6, 80333 München; E-Mail: jreitberger@web.de
- 2) Peter Krzystek, Hochschule München, Karlstr. 6, 80333 München; E-Mail: krzystek@hm.edu
- 3) Uwe Stilla, Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München; E-Mail: stilla@tum.de



First/Last Pulse Systemen (FL), die die erste und letzte Reflektion des Laserstrahls registrieren (Abb. 3), ermöglicht diese neue Technologie eine Analyse der im Empfänger ankommenden Signalform (Abb. 4). Seit 2004 gibt es kommerzielle Full Waveform Systeme (FW), die das gesamte reflektierte Signal registrieren (Details über Systeme siehe MALLÉT & BRETAR, 2008). Die im Echoprofil digitalisierte Empfangsenergie ist ein Maß für die vertikale Verteilung der beleuchteten Oberflächen, die in Richtung des Beobachtungsvektors und in Abhängigkeit der Reflektivität bzgl. der Wellenlänge den Laserstrahl zurückwerfen. Falls die Waldoberfläche sehr dicht mit einzelnen Echoprofilen abgedeckt werden kann, lassen sich somit Rückschlüsse über die gesamte räumliche Verteilung und Charakterisierung der Waldstruktur unter einer geschlossenen Waldoberfläche ziehen.

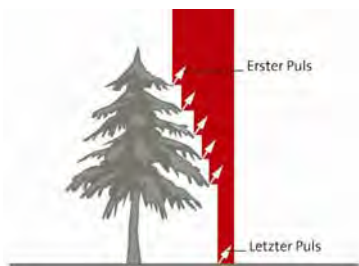


Abb. 3: First/Last Pulse Erfassung von Bäumen

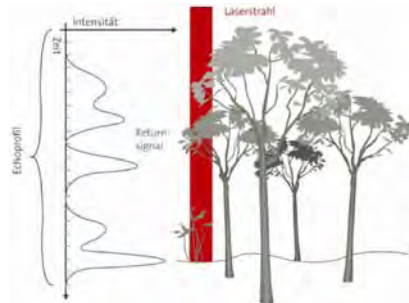


Abb. 4: Full Waveform Erfassung von Bäumen

Zwei Vorgehensweisen erscheinen dabei denkbar. Die erste Strategie nutzt direkt die Rohdaten entweder als einzelne Waveforms oder in einem vorgegebenen Raumbereich (z.B. Einzelbaum) summierte Waveforms. Da die Waveforms eine Funktion von Bauparametern (z.B. Baumalter, -art, -höhe, -krone) sind, können gemessene Waveforms mit theoretischen Modellen verglichen werden. Denkbar ist sogar eine Anpassung der theoretischen Modelle an die Messungen durch Optimierungsmethoden. Aktuelle Arbeiten, die in diese Richtung gehen, sind z.B. KÖTZ (2006) oder MORSDORF et al. (2008). Eine zweite Strategie zur Auswertung von Waveforms liegt in der Zerlegung der Waveforms in die einzelnen Reflektionsanteile. Dabei erhält man neben den 3D Positionen der einzelnen Reflektionen die Pulsenergie und die Pulsbreite des empfangenen Impulses als zusätzliche Punktattribute. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in einer erhöhten räumlichen Punktdichte, einer verbesserten Entfernungsgenauigkeit und den zusätzlichen Punktinformationen, die für eine Segmentierung und Klassifizierung verwendet werden können.

ALS wurde in den letzten Jahren zur Ableitung von Forstparametern für die Waldinventur umfangreich untersucht. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen flächenbasierten Methoden und Ansätzen, die den Einzelbaum als 3D Objekt detektieren und klassifizieren. Hauptfokus dieser Ansätze ist die Bestimmung der für eine Waldinventur wichtigen Parameter Holzvorrat, Holzuwachs und Baumartenverteilung. Da die Punktrate in den letzten Jahren ständig zunahm, rückten zunehmend auch Einzelbaumverfahren in den Vordergrund der Forschungsarbeiten. Stellvertretend seien hierfür die Arbeiten von HOLMGREN et al. (2004), PERSSON et al. (2002), KOCH et al. (2006), HEURICH (2006) und MALTAMO et al. (2007) genannt. Der Nachteil der

bisherigen Einzelbaumansätze ist, dass aus den lokalen Maxima eines Oberflächenmodells (DOM) Bäume segmentiert werden. Von der Oberschicht verdeckte Bäume können dabei nicht erkannt werden. Weiterhin werden die Bäume nicht als einzelne 3D Objekte detektiert. Die Berechnung des Holzvolumens erfolgt z.B. dabei über die Parameter Baumhöhe, Baumkronendurchmesser und Baumart. Diese Größen beschreiben die Baumkrone jedoch nur unvollständig. Die Berechnung des Holzvolumens, das ein wichtiger Zielparameter der Waldinventur ist, ist daher mit einer entsprechenden Unsicherheit behaftet. Weiterhin ist die Erkennung von Verjüngungen ein ungelöstes Problem. Ansätze, die die Baumstammverteilung über Verteilungsfunktionen schätzen, müssen aufwändig mit Felddaten kalibriert werden.

Der vorliegende Beitrag vergleicht das Potenzial der FL und FW Technologie zur Einzelbaumdetektion und Baumartenklassifizierung im Naturwald der Nationalparks Bayerischer Wald. Im Kapitel 2 wird auf der Basis einer Waveformzerlegung eine neuartige 3D Segmentierung vorgestellt. Kapitel 4 stellt Ergebnisse der Einzelbaumsegmentierung und der Baumartenklassifizierung mit FL-Daten und FW-Daten vor.

## 2 Waveformzerlegung

Eine Waveform  $w(t)$  wird als eine Überlagerung mehrerer Gaußfunktionen modelliert (Abb. 7)

$$w(t) = \varepsilon + \sum_{m=1}^{N_p} A_m \exp \left[ -\frac{(t-t_m)^2}{2\sigma_m^2} \right] \quad (1)$$

mit

$N_p$  : Anzahl von Gaußfunktionen

$A_m$  : Amplitude des mten Peaks

$\varepsilon$  : Rauchspegel in der Waveform

$t_m$  : Zeitposition des mten Peaks

$\sigma_m$  : Halbe Breite des mten Peaks bei  $\frac{A_m}{\sqrt{e}}$  (= Standardabweichung)

Die unbekannten Parameter werden in einer iterativen Ausgleichung geschätzt. Aus der Waveform kann für jede Reflektion  $i$  ein Vektor  $X_i^T = (x_i, y_i, z_i, W_i, I_i)$  ( $i = 1, \dots, N_R$ ) mit  $(x_i, y_i, z_i)$  als den 3D Koordinaten der Reflektion berechnet werden. Zusätzlich erhält man die Pulsbreite  $W_i = 2 \cdot \sigma_i$  und die Intensität  $I_i = \sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_i \cdot A_i$  des reflektierten Strahls mit  $\sigma_i$  als Standardabweichung und  $A_i$  als der Amplitude der Reflektion  $i$  (JUTZI & STILLA, 2006; REITBERGER et al., 2008a). Bemerkenswert ist, dass durch die Auswertung der Waveform praktisch jede Reflektion im Postprocessing erkannt werden kann. Im Gegensatz dazu können konventionelle Systeme maximal nur bis zu 5 Reflektionen erfassen und sind nach einer Reflektion wegen der Totzeit des Empfängers in einem Bereich von ca. 3 m praktisch blind. Dies gilt auch für die eingangs erwähnten MPiA-Systeme.

Auf der Basis der Waveformzerlegung konnte nachgewiesen werden, dass (i) Reflektionen mit einem Abstand von 40 cm noch aufgelöst werden können, (ii) die Genauigkeit der Höhenbestimmung ca. 2 cm (=1/7 der Auflösung von 15 cm) beträgt, (iii) im Vergleich zum konventionellen First/Last Pulse Verfahren 2 – 3 mal mehr 3D-Punkte im Vegetationsbereich zur Verfügung stehen, (iv) durch die hohe Punktdichte Mikrostrukturen von Bäumen (z.B.

Baumstamm, Baumäste) erfasst werden (siehe Abb. 8.1 und 8.2) und (v) dominierte Bäume, d.h. Bäume in der Unterschicht, erfasst werden können. Die Untersuchungen unterstreichen damit deutlich, dass FL-Systeme wegen der Detektionsmethode und der Totzone viele Reflektionen in der Baumstruktur ignorieren. Die Abbildungen 9.1 und 9.2 zeigen eine Baumgruppe von zwei Fichten, die mit einem FL-System (TopoSys Falcon II) und einem FW-System (Riegl LMS Q560) bei gleicher nominaler Punktdichte aufgenommen wurden. Die Baumkrone wird von dem FW-System mit einer wesentlich höheren räumlichen Punktdichte erfasst, da kurz hintereinander auftretende Reflektionen (Abb. 9.3) durch die Waveformzerlegung detektiert werden (Abb. 9.4).

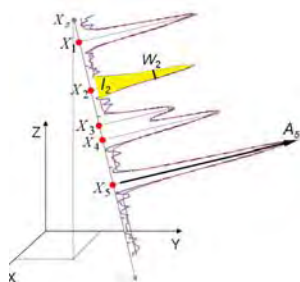


Abb. 7: Waveformzerlegung

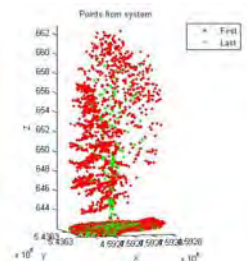


Abb. 8.1: Einzelbaum (mit FL erfasst)

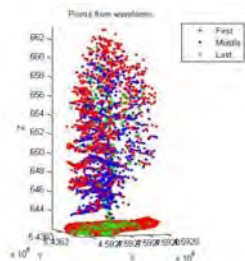


Abb. 8.2: Einzelbaum (mit FW erfasst)

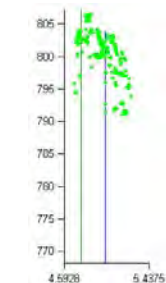


Abb. 9.1: Baumgruppe (mit FL erfasst)

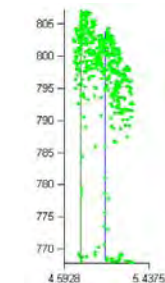


Abb. 9.2: Baumgruppe (mit FW erfasst)



Abb. 9.3: Detail der Baumkrone (mit FW)

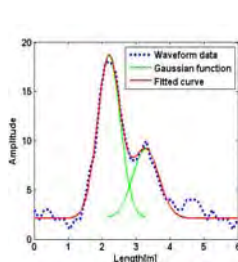


Abb. 9.4: Waveform zweier Reflektionen

## 2.1 3D Segmentierung

Die Grundidee der 3D Segmentierung ist es, die aus der Bildanalyse bekannte Normalized Cut Segmentierung (SHI & MALIK, 2000) in einer Voxelrepräsentation anzuwenden und Einzelbäume in 3D zu segmentieren. Die 3D Segmentierung nutzt die Positionen  $(x_i, y_i, z_i)$  der Reflektionen sowie die Pulsbreite  $W_i$  und die Pulsenergie  $I_i$  aus der Waveformzerlegung. Die Normalized Cut Segmentierung im Voxelraum basiert auf einem Graph  $G$ . Segmente  $A$  und  $B$  im Graph werden durch die Forderung gefunden, dass die Ähnlichkeit der Voxel in den Segmenten maximiert und die Ähnlichkeit zwischen den Segmenten minimiert wird. Die Segmente werden gefunden durch die Kostenfunktion

$$NCut(A, B) = \frac{Cut(A, B)}{Assoc(A, V)} + \frac{Cut(A, B)}{Assoc(B, V)} \quad (2)$$

mit  $Cut(A, B) = \sum_{i \in A, j \in B} w_{ij}$  als Summe der Gewichte zwischen den Segmenten und  $Assoc(A, V) = \sum_{i \in A, j \in V} w_{ij}$  als Summe der Gewichte aller Kanten, die im Segment A enden (Abb. 10.1).

Die Gewichte legen die Ähnlichkeit zwischen den Voxeln fest und sind eine Funktion der Punktverteilung und der Merkmalen, die man über  $I_i$  und  $W_i$  berechnen kann. Eine Minimumlösung wird über ein korrespondierendes Eigenwertproblem gefunden (REITBERGER et al., 2008b).

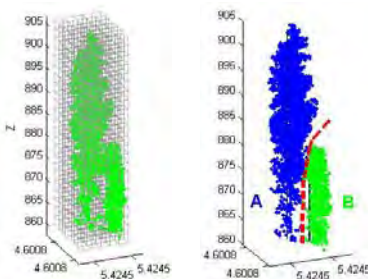


Abb. 10.1. Voxelunterteilung und Segmentierung von 2 Bäumen

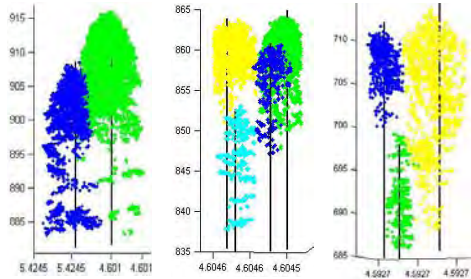


Abb. 10.2. Beispiele der Normalized Cut Segmentierung

Die 3D Segmentierung wird stark durch die a-priori Position von Bäumen gestützt, die wiederum durch eine vorgeschaltete Wasserscheidensegmentierung und Stammerkennung berechnet werden kann. Interessant ist weiterhin, dass der Ansatz nicht unbedingt von FW-Daten abhängt. Auch konventionelle FL-Daten können verwendet werden. Die Abbildungen 10.2 zeigen komplexe Situationen, in denen die 3D Segmentierung sehr gute Ergebnisse liefert. Zu beachten ist vor Allem, dass dominierte Bäume gut erkannt werden. Eine konventionelle Wasserscheidensegmentierung auf der Basis eines DOM würde diese Bäume nicht „sehen“.

### 3 Datenmaterial

Die Experimente konnten mit Unterstützung des Nationalparks Bayerischer Wald in den dort angelegten Referenzgebieten durchgeführt werden. Insgesamt 18 Referenzgebiete mit einer Größe zwischen 1000 m<sup>2</sup> und 3600 m<sup>2</sup> in den zwei Testgebieten E und C wurden ausgewählt. Insgesamt 688 Fichten (*Picea abies*), 812 Buchen (*Fagus sylvatica*), 70 Tannen (*Abies alba*), 71 Bergahorne (*Acer pseudoplatanus*), 21 Spitzahorne (*Acer platanoides*) und 2 Linden (*Tilia Europaea*) mit einem Bruthöhendurchmesser (BHD) größer 7 cm wurden ausgewählt. Baumparameter wie der BHD, Baumhöhe, Stammposition und Baumart wurden mit Tachymetrie, GPS und Vertex III bestimmt. Weiterhin wurden die Bäume bzgl. der Bestandshöhe in drei Baumschichten unterteilt. Insgesamt standen Daten von 3 FW-Befliegungen (belaubt und unbelaubt) und einer konventionellen FL-Befliegung (belaubt) zur Verfügung (HEURICH, 2006; REITBERGER et al., 2008b).

Befliegungszeit	Sept. '02	Mai '06	Mai '07	Mai '07
Datensatz	I	II	III	IV
Belaubung	belaubt	unbelaubt	belaubt	belaubt
Scanner	TopoSys Falcon II	Riegl LMS-Q560	Riegl LMS-Q560	Riegl LMS-Q560
Punkte/m <sup>2</sup>	10	25	25	10
Höhe über Grund	850	400	400	500
Footprint [cm]	85	20	20	25
Referenzgebiete	Alle	Alle	Alle	Nur Gebiet E

Tab. 1. Verschiedene Befliegungen mit FL und FW Scanner

## 4 Experimente

### 4.1 3D Segmentierung

Im Folgenden werden die Segmentierungsergebnisse für eine konventionelle 2D (Wasserscheiden-)Segmentierung („W“) und die neue 3D Segmentierung („Ncut“) gegenübergestellt (Tab. 2). Bei allen Datensätzen sieht man, dass die 2D Segmentierung insbesondere in den unteren beiden Schichten sehr schlechte Erkennungsraten liefert. Hier ergeben sich bei der 3D Segmentierung Verbesserungen im Bereich von 12% bis 20%. In der obersten Schicht gibt es bei den FW-Daten Verbesserungen im Bereich von 3% bis 10%. Insgesamt, d.h. für alle Schichten, liegen die Verbesserung bei 3% bis 12%, wobei der kleinste Wert bei den FL-Daten auftritt.

Äußerst interessant ist weiterhin der Vergleich zwischen FL-Pulse Daten und FW-Daten, die sich auf gleiche nominale Punktdichten beziehen (Datensätze I und IV). Die Kombination von FW-Daten mit der 3D Segmentierung verbessert die Erkennungsrate in den unteren beiden Schichten um 21% und insgesamt um 13%. Die Schlüsselfaktoren zu diesem Durchbruch sind einerseits die hohe räumliche Punktdichte und die neue 3D Segmentierung, die nicht die Waldoberfläche segmentiert sondern einen echten räumlichen Ansatz verfolgt. Die Abbildungen 11 verdeutlichen diese Zusammenhänge beispielhaft an einer Baumgruppe. Die 2D Segmentierung mit FL-Daten kann die Baumgruppe nicht trennen. Wenn man FW-Daten verwendet, kann die 2D Segmentierung die Baumgruppe auch nur unzureichend trennen. Erst die Kombination von FW-Daten und der 3D Segmentierung führt zu einer befriedigenden Trennung der Einzelbäume.

Der einzigartige Datensatz erlaubt auch noch andere Aussagen bzgl. der Punktdichte und des Belaubungszustands. Wenn man den Datensatz III auf das Gebiet E beschränkt und mit Datensatz IV vergleicht, ändern sich die Erkennungsraten praktisch nicht. Offensichtlich werden die wichtigsten Baumstrukturen auch bei einer reduzierten nominalen Punktdichte durch die Waveformzerlegung noch erfasst. Schließlich kann der Einfluss des Belaubungszustands analysiert werden. Aus dem Vergleich der Datensätze II (keine Belaubung) und Datensatz III (mit Belaubung) ist zu ersehen, dass – wie auch erwartet – die Erkennungsrate bei Belaubung in

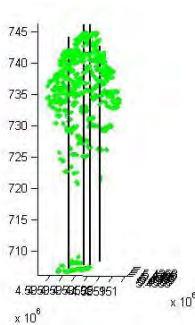


Abb. 11.1: Baumgruppe (mit FL erfasst)

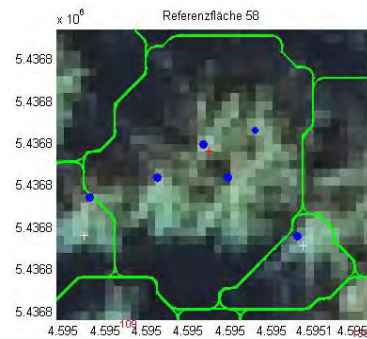


Abb. 11.2: Konventionelle Wasserscheidensegmentierung

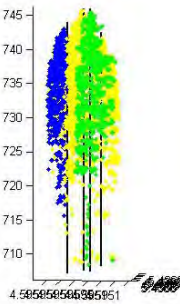


Abb. 11.3: Baumgruppe (mit FW erfasst)

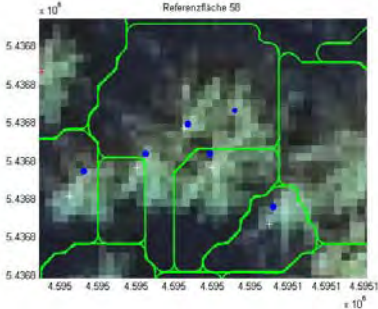


Abb. 11.4: Konventionelle Wasserscheidensegmentierung

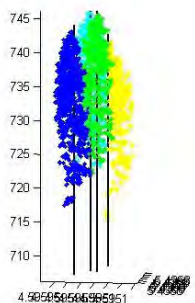


Abb. 11.5: Baumgruppe (mit FW erfasst)

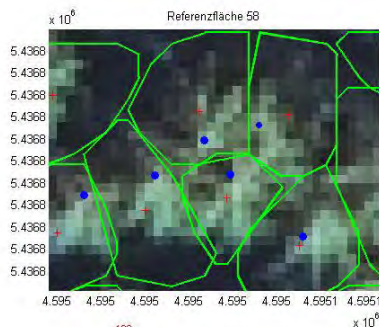


Abb. 11.6: 3D Segmentierung

den beiden unteren Schichten um ca. 4 % schlechter ist. Jedoch in der oberen Schicht sind die Ergebnisse der Normalized Cut Segmentierung fast gleich. Insgesamt ist nur ein minimaler Genauigkeitsverlust von 2 % nachzuweisen.

Datensatz	Methode	Erkannte Bäume in Höhenschicht [%]			
		unten	mittel	oben	gesamt
I (nur Gebiet E) belaubt	W	2	12	80	52
	NCut	15	27	77	55
II unbelaubt	W	5	21	77	48
	NCut	21	38	87	60
III belaubt	W	5	20	79	48
	NCut	17	32	86	58
IV (nur Gebiet E) belaubt	W	6	21	84	57
	NCut	26	33	87	65

Tab. 2. Ergebnisse der Segmentierung mit den Datensätzen I, II, III und IV

## 4.2 Baumartenklassifikation

In der nachfolgenden Tab. 4 sind die Ergebnisse einer überwachten Baumartenklassifikation für die 3D Segmente zusammengefasst. Folgende Merkmale („M“) wurden in einer Maximum-Likelihood Klassifikation verwendet (Details siehe REITBERGER et al., 2008a).

M	Definition	M	Definition
$s_g$	Mittlere horizontale Entfernung der Layerpunkte zum Baumstamm	$s_w$	Mittlere Pulsbreite von Einzel- und Erstreflektionen
$s_i$	Mittlere Intensität im gesamten Baumsegment	$s_n$	Verhältnis der Anzahl von Einzel- zu Mehrfachreflektionen

Tab. 3. Merkmalsdefinition für Baumartenklassifizierung

Interessanterweise erweist sich das Intensitätsmerkmal  $s_i$  als das beste Merkmal im Belaubungszustand (Datensätze III und IV). Allerdings verliert dieses Merkmal im belaubungsfreien Zustand an Bedeutung. In diesem Fall kann aber das Merkmal  $s_n$ , das die Durchdringungscharakteristik beschreibt, die Klassifikation positiv beeinflussen. Das Merkmal  $s_w$ , das die Pulsbreite der Reflektionen nutzt, wirkt im belaubungsfreien Zustand besser als im Belaubungszustand. Das Baumkronenmerkmal  $s_g$ , das die äußere Form der Baumkrone beschreibt, hat einen fast gleichbleibenden Einfluss auf das Ergebnis im Belaubungszustand und im belaubungsfreien Zustand. Die Genauigkeit ist sogar für Datensatz I (FL-Daten bei einer Punktdichte von 10 Punkten/m<sup>2</sup>) die gleiche als bei FW-Daten. Dieses Merkmal ist also auch für niedrige Punktdichten signifikant. Schließlich noch einige Bemerkungen zum Einfluss des Belaubungszustands auf das Klassifikationsergebnis. Die Datensätze II und III zeigen etwa gleiche Klassifikationsergebnisse, wobei die Signifikanz der einzelnen Merkmale unterschiedlich ist. Interessanterweise beeinflusst die Punktdichte auch kaum die Ergebnisse (siehe Datensatz III (nur Gebiet E) und Datensatz IV (nur Gebiet E)). Ebenso zeigt der Vergleich zwischen Datensatz I und Datensatz IV (nur Gebiet E), die beide eine Punktdichte von 10 Punkten/m<sup>2</sup> aufweisen, dass die Klassifikation mit FL-Daten um 19 % schlechter ist als mit FW-Daten. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass nur die 3D Koordinaten der Reflektionen zur Verfügung stehen und damit nur das Baumgeometriemerkmal  $s_g$  verwendet werden konnte.

Merkmal	Overall accuracy (%) für Datensätze I - IV ( <b>3D Segmente</b> )				
	I (nur Gebiet E)	II	III	III (nur Gebiet E)	IV (nur Gebiet E)
	belaubt	unbelaubt	belaubt	belaubt	belaubt
$S_g$	78	78	82	82	81
$S_f$	-	81	94	96	97
$S_W$	-	79	51	56	64
$S_n$	-	93	63	65	57
$S_g + S_f$	-	86	94	97	97
$S_g + S_f + S_W + S_n$	-	94	95	97	97

Tab. 4. Ergebnisse einer überwachten Baumartenklassifizierung mit 3D Segmenten

## 5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen zeigen, dass der Einsatz der Full Waveform Technologie in Kombination mit einer neuartigen 3D Segmentierung einen entscheidenden Durchbruch erbringt. Im Einzelnen lässt sich feststellen, dass (i) das neue 3D Segmentierungsverfahren eine deutliche Verbesserung der Erkennungsrate von Einzelbäumen erbringt, (ii) eine Steigerung der Erkennungsrate in der Unterschicht von mehr als 20 % nachweisbar ist, (iii) die Klassifikation der Einzelbäume in Nadel- und Laubbäume für die über die 3D Segmentierung gefundenen Einzelbäume sowohl im belaubten und nichtbelaubten Zustand mit ausreichender Genauigkeit von 95% gelingt und (iv) die Intensität der 3D Punkte die Klassifikation deutlich unterstützt.

Die vorgestellte 3D Segmentierung ist noch über eine gezielte Nachbearbeitung verbesserungsfähig. Zum Beispiel könnten Segmente, die eine bestimmte Größe überschreiten, detailliert im Hinblick auf eine mögliche weitere Zerlegung untersucht werden. Desweiteren muss die baumartenspezifische Interaktion des Laserstrahls genauer analysiert werden, um die Information der FW-Daten besser auszunutzen. Weiterhin erscheint eine Fusion von FW-Daten mit Multispektral- oder Hyperspektraldaten vielversprechend.

## 6 Danksagung

Die Autoren möchten sich für die Unterstützung und die Bereitstellung der FL-Daten durch den Nationalpark Bayerischer Wald (Dr. M. Heurich) bedanken. Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 1702403 gefördert.

## 7 Literaturverzeichnis

HEURICH, M., 2006: Evaluierung und Entwicklung von Methoden zur automatisierten Erfassung von Waldstrukturen aus Daten flugzeuggetragener Fernerkundungssensoren. Forstlicher



- Forschungsbericht München, Nr. 202, ISBN 3-933506-33-6. <http://meadiatum2.ub.tum.de/>. (Zugriff 16. Dezember, 2008).
- HOLMGREN, J. & PERSSON, A., 2004: Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sensing of Environment*, 90, pp. 415–423.
- HUG, CH., 2008: Neue Trends in Airborne Laser Scanning. Forum Geoinformation “Airborne Laserscanning”, Hochschule München, Fakultät für Geoinformation, 06.06.2008, [http://www.fh-muenchen.de/home/fb/fb08/archiv/forum\\_geoinfo/08-06-06\\_laserscann/download/FG\\_2008\\_Hug.pdf](http://www.fh-muenchen.de/home/fb/fb08/archiv/forum_geoinfo/08-06-06_laserscann/download/FG_2008_Hug.pdf). (Zugriff 12. Januar, 2009).
- JUTZI, B. & STILLA, U., 2006: Range determination with waveform recording laser systems using a Wiener Filter. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61, pp. 95–107.
- KOCH, B.; HEYDER, U. & WEINACKER, H., 2006: Detection of Individual Tree Crowns in Airborne Lidar Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72, 4: 357–363.
- KÖTZ, B., 2006: Estimating biophysical and biochemical properties over heterogeneous vegetation canopies - Radiative transfer modeling in forest canopies based on imaging spectrometry and LIDAR. Dissertation, ETH Zürich. <http://www.dissertationen.unizh.ch/2006/koetz/diss.pdf>. (Zugriff 16. Dezember, 2008).
- MALLET, C. & BRETAR, F., 2008: Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64 (2009), S. 1 – 16.
- MALTAMO, M.; PACKALÉN, P.; PEUHKURINEN, J.; SUVANTO, A.; PESONEN, A. & HYYPPÄ, J., 2007: Experiences and Possibilities of ALS Based Forest Inventory in Finland. *Proceedings of the ISPRS Workshop Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*, Volume XXXVI, PART 3/W52, 12 – 14<sup>th</sup> September 2007, Espoo, pp. 270 – 279.
- MORSODORF, F.; NICHOL, C.; MALTHUS, T.J.; PATENAUDE, G. & WOODHOUSE, I.H., 2008: Modelling multi-spectral LIDAR vegetation backscatter – assessing structural and physiological information content. *SilviLaser 2008*, Sept. 17-19, Edinburgh, UK.
- PERSSON, A.; HOLMGREN, J. & SÖDERMAN, U., 2002: Detecting and measuring individual trees using an airborne laserscanner. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 68(9), pp. 925–932.
- REITBERGER, J.; KRZYTEK, P. & STILLA, U., 2008a: Analysis of full waveform LIDAR data for the classification of deciduous and coniferous trees. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 29, No. 5, March 2008 , pp. 1407 – 1431.
- REITBERGER, J.; KRZYTEK, P. & STILLA, U., 2008B: 3D segmentation and classification of single trees with full waveform LiDAR data. *Proceedings of SilviLaser 2008*, 8<sup>th</sup> international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory, Edinburgh, UK, pp. 216 – 226.
- ROTH, R.B. & THOMPSON, J., 2008: Practical application of multiple-pulse in the air. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34 (Part), S. 183-188.
- SHI, J. & MALIK, J., 2000: Normalized cuts and image segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22, pp. 888-905.

## Untersuchungen zur Verbesserung der Georeferenzierung von ALS-Streifen ohne Verwendung von GNSS-IMU-Trajektorien

CAMILLO RESSL<sup>1</sup>, GOTTFRIED MANDLBURGER<sup>2</sup> & NORBERT PFEIFER<sup>3</sup>

*Zusammenfassung: Airborne Laserscanning (ALS) benötigt ein GNSS (Global Navigation Satellite System; z.B. GPS) und eine IMU (Inertial Measurement Unit), um während des Flugs die momentane Orientierung des Scannersystems zu bestimmen. Die geringe aber doch vorhandene Instabilität der beteiligten Größen – speziell der sogenannten mounting calibration – bedingen im Allgemeinen eine ALS-Streifenausgleichung. Um diese rigoros durchführen zu können, werden die GNSS- und IMU-Daten in Form der Trajektorie benötigt. In manchen Fällen sind diese aber dem Nutzer nicht (mehr) zugänglich. Angelehnt an das rigorose Modell präsentiert der Artikel ein einfaches Modell für eine Streifenausgleichung ohne GNSS-IMU-Trajektorien mit fünf Parametern pro Streifen: ein 3D-Verschiebungsvektor, ein Rollwinkel, und ein affiner Yaw-Parameter. In einem realen Beispiel mit 61 Streifen wird mit diesem Ansatz eine relative Genauigkeitssteigerung der Lagekoordinaten von ca. 40cm erreicht. Das Beispiel demonstriert deutlich die große Bedeutung des affinen Yaw-Parameters für eine Streifenausgleichung ohne GNSS-IMU-Trajektorien.*

### 1 Einleitung

Airborne Laserscanning (ALS) hat sich in den letzten 10 Jahren als primäre Datenerfassungsmethode für digitale Oberflächen- und Geländemodelle etabliert. ALS verwendet ein Multisensorsystem und beruht auf dem Verfahren der direkten Georeferenzierung (SKALLOUD (2007)). Dabei wird die momentane Position und Verdrehung des Lasers mittels GNSS (Global Navigation Satellite System; z.B. GPS) und IMU (Inertial Measurement Unit) gemessen. Weiters benötigt man für eine korrekte Georeferenzierung der originalen Lasermessungen die internen Laserparameter (z.B. Nullpunkt und Maßstab der Strecken- und Winkelmessung) und die Parameter der sogenannten *mounting calibration*. Letztere beschreibt relativ zum Laserscannersystem die Verdrehung und Verschiebung des IMU-Systems und des GNSS-Antennenzenrums.

Ein Problem der direkten Georeferenzierung liegt darin, dass die erwähnten Parameter eine gewisse zeitliche Instabilität aufweisen (speziell die Verdrehung zwischen IMU und Laserscannersystem). Aus diesem Grund unterscheiden sich die Werte während einer konkreten Befliegung geringfügig von den zuletzt (etwa im Zuge einer Kalibrierung) bestimmten Werten. Diese Transformationsparameter können während der GNSS-IMU-Prozessierung nicht korrigiert werden, da die Lasermessungen in dieser Vorabprozessierung nicht teilnehmen. Selbst die

---

<sup>1</sup> Camillo Ressel, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien, car@ipf.tuwien.ac.at

<sup>2</sup> Gottfried Mandlbürger, Christian Doppler Laboratory for "Spatial Data from Laser Scanning and Remote Sensing", Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien, gm@ipf.tuwien.ac.at

<sup>3</sup> Norbert Pfeifer, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien, np@ipf.tuwien.ac.at

Synchronisation zwischen den GNSS/IMU-Daten und den Lasermessungen kann fehlerhaft sein. Somit wird die direkte Georeferenzierung mit gering falschen Transformationsparametern durchgeführt. Konsequenterweise sind die berechneten Koordinaten der gescannten Punkte falsch. Dies kann sich z.B. in Sprüngen entlang der Streifenränder bei der Gelände-modellbestimmung äußern.

Um die Genauigkeit der Punkte zu verbessern, ist somit im Allgemeinen eine Streifenausgleichung im Stile der Bündelblockausgleichung durchzuführen. Dabei würden die erwähnten internen Laserparameter, die mounting calibration und ein Zeitfehler optimal bestimmt werden. Voraussetzung für eine solche Parameterbestimmung ist die Kenntnis der GNSS-IMU-Trajektorien. In manchen Projekten werden nur die direkt georeferenzierten Punkte an den Auftraggeber geliefert – aber keine GNSS- und IMU-Daten. Falls im Zuge der Qualitätskontrolle der gescannten Daten Probleme auftauchen, ist somit eine Streifen-ausgleichung ohne GNSS- und IMU-Daten anzudenken.

Im Artikel wird eine solche ALS-Streifenausgleichung ohne GNSS- und IMU-Daten beschrieben. Kapitel 2 leitet das verwendete mathematische Modell aus dem strengen Modell mit Hilfe von Wirkungsfiguren her. Im Kapitel 3 wird es mit einem realen Datensatz bestehend aus 61 ALS-Streifen getestet. Eine Zusammenfassung und ein Ausblick folgen in Kapitel 4.

## 2 Mathematisches Modell für eine ALS-Streifenausgleichung ohne GNSS- und IMU-Daten

Falls die GNSS-IMU-Trajektorien gegeben sind, kann eine rigorose Streifenausgleichung durchgeführt werden; z.B. KAGER (2004), FRIESS (2006), SKALoud & LICHTI (2006), BURMAN (2000), FILIN (2001), KILIAN et al. (1996). Dabei werden – je nach verwendetem Ansatz – Verbesserungen für die internen Laserparameter und die mounting calibration sowie zusätzliche Korrekturparameter (z.B. für die Zeitsynchronisierung) bestimmt. Im Anschluss an die Streifenausgleichung werden die originalen Oberflächenpunkte  $\mathbf{X}$  mit den so verbesserten Parametern transformiert. Es ergeben sich dadurch korrigierte Oberflächenpunkte  $\mathbf{X} + \Delta\mathbf{X}$ . Grundlage für die Ausgleichung und die Korrektur der Daten ist die Abbildungsgleichung, die die Transformation von den originalen Lasermessungen in die 3D-Koordinaten der gemessenen Oberflächenpunkte unter Verwendung der GNSS-IMU-Trajektorien darstellt. In Anlehnung an SKALoud & LICHTI (2006) lautet die Abbildungsgleichung wie folgt:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_{\text{GNSS}} + \mathbf{R}_{\text{IMU}} \cdot \left( \mathbf{m} - \mathbf{R}_{\text{M}} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ \rho \cdot \sin \theta \\ \rho \cdot \cos \theta \end{pmatrix} \right) \quad (1)$$

$\mathbf{X}$  ist der Oberflächenpunkt im Referenzsystem. Das Antennenzentrum  $\mathbf{X}_{\text{GNSS}}$  und die Verdrehung  $\mathbf{R}_{\text{IMU}}$  der IMU beschreiben Position und Ausrichtung des Flugzeuges im Referenzsystem. Das System des Lasers ist gegenüber dem IMU-System ein wenig um  $\mathbf{R}_{\text{M}}$  verdreht und gegenüber dem Antennenzentrum um  $\mathbf{m}$  verschoben.  $\mathbf{R}_{\text{M}}$  und  $\mathbf{m}$  bilden die

mounting calibration. Der Laser misst zum Oberflächenpunkt die Distanz  $\rho$  unter dem Ablenkwinkel  $\theta$ .

Nach der Streifenausgleichung lassen sich mit Gleichung (1) die Korrekturen  $\Delta\mathbf{X}$  der original gemessenen Punkte als Funktion der 3D-Koordinaten  $\mathbf{X}$ , der Messzeit  $t$ , der GNSS-IMU-Trajektorien, der verbesserten internen Laserparameter ( $\Delta\mathbf{i}$ ) und der verbesserten mounting calibration ( $\mathbf{R}_M + \Delta\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{m} + \Delta\mathbf{m}$ ) ausdrücken:

$$\Delta\mathbf{X} = \Delta\mathbf{X}(\mathbf{X}, t, \mathbf{X}_{\text{GNSS}}(t), \mathbf{R}_{\text{IMU}}(t), \mathbf{R}_M + \Delta\mathbf{R}_M, \mathbf{m} + \Delta\mathbf{m}, \Delta\mathbf{i}) \quad (2)$$

Um nun ohne GNSS-IMU-Trajektorien eine Korrektur der originalen Punkte durchzuführen, benötigt man eine „neue“ Abbildungsgleichung, oder besser *Korrekturfunktion*, mit Hilfe derer andere Korrekturen  $\Delta\bar{\mathbf{X}}$  an den original gemessenen Punkten angebracht werden. Diese Korrekturen werden als Funktion der 3D-Koordinaten der gemessenen Punkte und neuen Parametern  $a_i$  ausgedrückt:  $\Delta\bar{\mathbf{X}} = \Delta\bar{\mathbf{X}}(\mathbf{X}, a_i)$ . Da die in den GNSS-IMU-Trajektorien verspeicherte Dynamik während der Befliegung hier nicht berücksichtigt wird, können die Korrekturen  $\Delta\bar{\mathbf{X}}$  immer nur eine Approximation an die Korrekturen  $\Delta\mathbf{X}$  darstellen, die man über (2) erhält. Es stellt sich somit die Frage nach einer geeigneten Korrekturfunktion.

Während es zur Streifenausgleichung mit gegebenen GNSS-IMU-Trajektorien sehr viele Publikationen gibt (siehe oben), ist die Anzahl der Publikationen bezüglich Streifenausgleichung ohne GNSS-IMU-Trajektorien relativ gering. Einfachere Ansätze führen nur eine Höhenanpassung durch (z.B. CROMBAGHS et al. (2000), KAGER & KRAUS (2001)). Da speziell Fehler in der Rotationskomponente der mounting calibration deutliche Lagefehler verursachen, sind diese 1D-Ansätze den 3D-Anätzen unterlegen. FILIN & VOSSELMAN (2004) verwenden einen 3D-Verschiebungsvektor pro Streifen. FRITSCH & KILIAN (1994) setzen pro Streifen eine räumliche Ähnlichkeitstransformation an. Diese Transformation wird auch von CSANYI & TOTH (2007) verwendet. VOSSELMAN & MAAS (2001) verwenden pro Streifen 9 Parameter: einen 3D-Verschiebungsvektor, eine räumliche Drehmatrix (3 Parameter) und eine differentielle Rotationsänderung (3 Parameter), deren Wirkung linear mit der Koordinate in Streifenrichtung wirkt. Dieser Ansatz beinhaltet somit zwei bi-lineare und einen quadratischen Term.

Funktionen höherer Ordnung bergen grundsätzlich die Gefahr des Ausschlingens in unkontrollierten Bereichen. Andere unkontrollierte Effekte können bei sehr großer Parameteranzahl  $a_i$  eintreten. Somit sind grundsätzlich einfache Funktionen mit möglichst wenigen Parametern vorzuziehen. Dies zeigt sich auch in den Ansätzen der oben zitierten Publikationen. Die einfachsten Funktionen sind linear in ihren Parametern bzw. den Koordinaten der Punkte. Erfahrungsgemäß sind die Fehler der internen Laserparameter und der mounting calibration sehr klein. Auch die Korrekturen  $\Delta\mathbf{X}$  mit typischer Weise wenigen Dezimetern sind dann sehr klein gegenüber der Flughöhe von einigen hundert Metern (d.h. der Hebel, über den die falschen Parameter wirken). Daher wird in dieser Arbeit ein linearer Ansatz für die Korrekturfunktion verfolgt. In vielen bisherigen Projekten (wo die GNSS-IMU-Trajektorien zur Verfügung standen) hat sich die Verbesserung der Rotationskomponenten der mounting calibration als besonders effektiv erwiesen. Daher wird speziell versucht deren Wirkung auf die Oberflächenpunkte linear zu formulieren. Folgende Annahmen werden

getroffen: Die Befliegung erfolgt geradlinig in konstanter Flughöhe über Grund und das Gelände verläuft horizontal.

Folgende Abb. 1 zeigt die Auswirkung der Fehler in den Rotationskomponenten der mounting calibration auf die Scanebene des Lasers. Es wird dabei ein lokales x-y-z System definiert: die x-Achse weist in Flugrichtung, die z-Achse weist lotrecht nach oben und die y-Achse vervollständigt das Rechtssystem. Sinnvollerweise stellt man die Rotationskomponenten der mounting calibration als Roll-, Pitch- und Yaw-Winkel dar. Dabei erfolgt die Roll-Drehung um die x-Achse, die Pitch-Drehung um die y-Achse und die Yaw-Drehung um die z-Achse.

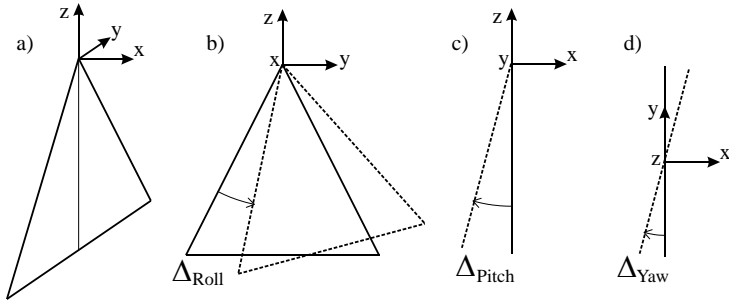


Abb. 1: Auswirkung der Fehler in den Rotationskomponenten der mounting calibration auf die Scanebene des Lasers. a) Definition des lokalen x-y-z Systems der Scanebene mit x-Achse in Flugrichtung, b) – d) Auswirkung der Roll-, Pitch- und Yaw-Komponente.

Anhand von Abb. 1 sieht man, dass ein kleiner Fehler in der Pitch-Komponente der mounting calibration in erster Näherung eine konstante Verschiebung in Flugrichtung verursacht. Ein kleiner Fehler in der Yaw-Komponente führt in erster Näherung ebenfalls zu einer Verschiebung in Flugrichtung – jedoch ist diese nicht konstant, sondern wächst mit der y-Koordinate der Oberflächenpunkte.

Somit lassen sich die Effekte der genannten Drehkomponenten wie folgt in den Koordinaten des lokalen x-y-z Systems ausdrücken:

$$\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos a_{Roll} & -\sin a_{Roll} \\ 0 & \sin a_{Roll} & \cos a_{Roll} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & a_{Yaw} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{Pitch} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \mathbf{R}_{Roll} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{a}' \quad (3)$$

Um diese Korrekturfunktion auf die im *übergeordneten* X-Y-Z System gegebenen 3D-Koordinaten der Oberflächenpunkte eines Streifens anwenden zu können, sind diese Punkte zunächst in das lokale x-y-z System zu transformieren. Unter der Annahme eines geradlinigen Flugstreifens kann diese Transformation wie folgt formuliert werden:

$$\mathbf{x} = \mathbf{R}_{Z,\alpha} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{S}) - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ H \end{pmatrix} \quad (4)$$

Hierbei beschreibt  $\mathbf{R}_{Z,\alpha}$  eine Drehung um den Winkel  $\alpha$  um die übergeordnete Z-Achse, wobei der Winkel  $\alpha$  die genäherte Streifenrichtung ist.  $\mathbf{S}$  ist der Schwerpunkt der Oberflächenpunkte des betrachteten Flugstreifens.  $H$  ist die absolute Flughöhe innerhalb des Streifens. Es wird sich zeigen, dass letztere aber ohne Bedeutung ist. Durch Einsetzen von (4) in (3) erhält man:

$$\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x} = \mathbf{R}_{Roll} \cdot \mathbf{A} \cdot \left( \mathbf{R}_{Z,\alpha} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{S}) - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ H \end{pmatrix} \right) + \mathbf{a}'$$

Wendet man darauf die inverse Transformation von (4) an und summiert man alle sich dabei ergebenden Vektoren zu einem neuen Vektor  $\mathbf{a}$  auf (ausgenommen wird  $\mathbf{S}$  aus numerischen Gründen), erhält man letztendlich folgende Korrekturfunktion:

$$\mathbf{X} + \Delta \mathbf{X} = \mathbf{R}_{Z,\alpha}^T \cdot \mathbf{R}_{Roll} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{R}_{Z,\alpha} (\mathbf{X} - \mathbf{S}) + \mathbf{S} + \mathbf{a} \quad (5)$$

Das ist die Grundgleichung für die ALS-Streifenausgleichung ohne GNSS- und IMU-Daten in dieser Arbeit. Sinnvollerweise setzt man den Verschiebungsvektor  $\mathbf{a}$  mit drei unbekannten Elementen an. Damit werden neben dem Effekt eines Fehlers in der Pitch-Komponente auch allfällige weitere reine Verschiebungsfehler berücksichtigt – etwa wegen eines geringfügigen Datumsfehlers der GNSS-Daten. Im Falle einer ruhigen Flugbahn können damit auch Fehler in der Verschiebungskomponente der mounting calibration (der sogenannte *lever arm*) kompensiert werden.

Zusammen mit dem Roll-Winkel  $a_{Roll}$  und dem affinen Yaw-Parameter  $a_{Yaw}$  enthält dieses Modell somit 5 unbekannte Korrekturparameter pro Streifen; d.h.  $\Delta \mathbf{X} = \Delta \mathbf{X}(\mathbf{X}, a_X, a_Y, a_Z, a_{Roll}, a_{Yaw})$ . Diese 5 Korrekturparameter werden im Rahmen einer Ausgleichung so bestimmt, dass die Abweichungen zwischen korrespondierenden Verknüpfungsobjekten in überlappenden Streifen und zu gegebenen Passobjekten minimiert werden. Dieses Korrekturmodell erinnert an die photogrammetrische Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen. Dort werden drei Drehwinkel angesetzt, während hier nur ein Drehwinkel und zusätzlich ein affiner Term verwendet werden.

*Anmerkung:* Man könnte den Roll-Effekt in (3) bei horizontalem Gelände gleichwertig auch über einen weiteren affinen Parameter in  $\mathbf{A}$  statt über einen Winkel und trigonometrische Funktionen formulieren. Jedoch hat die Formulierung als Drehmatrix den Vorteil, dass automatisch auch der Effekt der Rollkomponente bei unebenem Gelände mitkompensiert wird.

Falls die Befliegung in Ost-West-Richtung erfolgt ist, wird das Modell (5) besonders einfach:

$$\mathbf{X} + \Delta \mathbf{X} = \mathbf{R}_{Roll} \cdot \mathbf{A} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{S}) + \mathbf{S} + \mathbf{a} \quad (6)$$

### 3 Ein Fallbeispiel

Aus einem ALS-Datensatz, der einen Teil des Main Flusses abdeckt, sollten im Rahmen eines Projektes markante Geländekanten extrahiert werden. Die Laserdaten waren streifenweise gegeben. Im Zuge einer ersten Qualitätskontrolle wurden im Überlappungsbereich benachbarter Streifen große, nicht tolerierbare systematische Restfehler von einigen dm speziell in Flugrichtung festgestellt (siehe Tab. 1, Variante A). Aus diesem Grund war es notwendig, die Georeferenzierung der Daten durch eine Streifenausgleichung zu verbessern. Da die GNSS- und IMU-Daten nicht zur Verfügung standen, war eine entsprechende Ausgleichung ohne diese Daten durchzuführen.

Die 61 Streifen überdecken ein Gebiet von ca. 10km (Ost-West) mal 17km (Nord-Süd). Sie überlappen sich zu knapp 50% und wurden in Ost-West-Richtung beflogen. Somit konnte das einfachere Modell (6) angewendet werden.

Für die Streifenausgleichung sind korrespondierende Objekte im Überlappungsbereich der Streifen notwendig. Aufgrund positiver Erfahrungen mit *least squares matching* (LSM) für die Bestimmung von Diskrepanzen im Überlappungsbereich von Streifen (RESSL et al. (2008)), wurden LSM-Punkte als korrespondierende Objekte verwendet. Hierzu wurde für jeden Streifen zunächst ein Oberflächenmodell mit 1m Gitterweite interpoliert. Danach wurden manuell für das LSM geeignete Stellen im Überlappungsbereich der Streifen gesucht. Das sind Stellen mit möglichst unterschiedlichen Oberflächennormalen, z.B. bei Häusergruppen. Die eigentliche Messung der korrespondierenden Punkte wurde mittels LSM durchgeführt, wobei quadratische Fenster mit 101 Pixeln Seitenlänge verwendet wurden. Um die störenden Effekte von Vegetation und Verdeckungen zu beseitigen, wurden beim LSM nur „glatte“ Oberflächenpixel verwendet. Dazu diente eine Glattheitsmaske (siehe RESSL et al. (2008)). Die später durchgeführte Streifenausgleichung ergab eine geschätzte Messgenauigkeit für die LSM-Messungen von ca. 5cm in X und Y und ca. 1.5cm in Z. Es wurden pro Streifen ca. 10 – 50 korrespondierende Punkte gemessen. Dabei wurden hauptsächlich Häusergruppen verwendet, aber auch erkennbare Variationen am Gelände (speziell um eine homogene Punktverteilung zu ermöglichen).

Eine homogene (und möglichst dichte) Verteilung der Verknüpfungspunkte ist besonders wichtig. Das gilt zwar generell für Transformationsbestimmungen, aber in besonderem Maße für den hier verwendeten Ansatz. Die Transformationsparameter der verwendeten Korrekturfunktion (6) werden so bestimmt, dass an den Stellen, wo Verknüpfungsinformation vorhanden ist, die Widersprüche minimiert werden. Die so bestimmte Korrekturfunktion wird dann im verknüpften Bereich gut passen (in der Größenordnung der Rest-Widersprüche). Da die Korrekturfunktion aber nicht in der Lage ist, die Dynamik der Datenentstehung wiederzugeben, wird in den nicht verknüpften Bereichen eigentlich extrapoliert (im Gegensatz zum rigorosen Ansatz mit Verwendung der GNSS-IMU-Trajektorie). Somit kann die Qualität in den nicht verknüpften Bereichen nach Anwendung der Korrekturfunktion nicht vorhergesagt werden. Das erklärt, warum gerade bei der Streifenausgleichung ohne GNSS-IMU-Trajektorie auf eine gute Verteilung der Verknüpfungspunkte zu achten ist.

Das vertikale Datum der Streifenausgleichung wurde durch drei Höhenpassflächen festgelegt. Eine Überlagerung der originalen Laserdaten mit einem vorhandenen Situationslayer des überdeckten Gebiets ließ keine deutlichen Lageverschiebungen erkennen (dennoch existierten *zwischen* den Streifen große Diskrepanzen). Aus diesem Grund und der Tatsache, dass es nicht möglich war, zwischen Situationslayer und Laserdaten sinnvolle Korrespondenzen zu finden, die eine genauere Lageeinpassung ermöglichen, sollten die Streifen im Rahmen der Ausgleichung so wenig wie möglich verschoben werden. Dies wird dadurch realisiert, dass die 3D-Verschiebung jedes Streifens fiktiv mit  $(0/0/0) \pm (0.3/0.3/0.3)$  (in Meter) beobachtet wird. Im Hinblick auf die möglichen 5 Unbekannten pro Streifen, ist damit das Datum festgelegt.

Für dieses Datum und die korrespondierenden Punkte wurde die Streifenausgleichung mit vier unterschiedlichen Parameternsätzen ( $a_X, a_Y, a_Z, a_{Roll}, a_{Yaw}$ ) durchgeführt: A) alle Parameter werden bei Null festgehalten (das entspricht der originalen Georeferenzierung der Streifen); B) die Streifen werden nur verschoben; C) zusätzlich wird pro Streifen ein Roll-Parameter  $a_{Roll}$  bestimmt; D) wie C) plus *einem* Yaw-Parameter  $a_{Yaw,Block}$  für den *gesamten* Block. Bei den Varianten B und C führten die fiktiven Beobachtungen für die Verschiebungen der Streifen zu großen Widersprüchen und mussten eliminiert werden. Das Datum wurde hier durch Festhalten der Horizontal-Verschiebung des mittleren Streifens definiert. Folgende Tabelle zeigt die RMS-Werte der Residuen nach der jeweiligen Streifenausgleichung.

Variante	Parameter	RMS(X) [m]	RMS(Y) [m]	RMS(Z) [m]
A	keine (originaler Zustand)	0.353	0.127	0.022
B	$a_X, a_Y, a_Z$	0.035	0.039	0.017
C	$a_X, a_Y, a_Z, a_{Roll}$	0.035	0.036	0.011
D	$a_X, a_Y, a_Z, a_{Roll}, (a_{Yaw,Block})$	0.036	0.036	0.012

Tab. 1: RMS-Werte der Residuen der Verknüpfungspunkte am Ende der verschiedenen Varianten der Streifenausgleichung (1625 Residuen pro Koordinate).  $a_{Yaw,Block}$  wurde aus dem Ergebnis von Variante C abgeschätzt und für Variante D als Konstante für alle Streifen eingeführt.

Beim originalen Zustand der Daten (Variante A) fällt im Vergleich zur Höhengenaugkeit besonders die schlechte Lagegenauigkeit auf. Als Ursache wird ein Fehler in der Rotationskomponente der mounting calibration vermutet. Weiters sieht man, dass bereits das einfache Modell B mit nur einem 3D-Verschiebungsvektor pro Streifen eine deutliche *Verbesserung der relativen Orientierung* der Streifen bewirkt und dass die Hinzunahme von  $a_{Roll}$  und  $a_{Yaw,Block}$  (außer in Z) kaum eine zusätzliche Verbesserung bringt. Die Modelle B und C sind aber trotzdem nicht zu empfehlen, da sie zu einer deutlichen *Verschlechterung der absoluten Orientierung* der Streifen führen. Angedeutet wird das bereits durch den Umstand, dass diese beiden Varianten zu großen Widersprüchen bei den fiktiven Beobachtungen für die Verschiebungen der Streifen führen. Die Verschlechterung der absoluten Orientierung wird durch die Abb. 2 erklärt, die die Transformationsparameter jedes Streifens von Variante C darstellt.



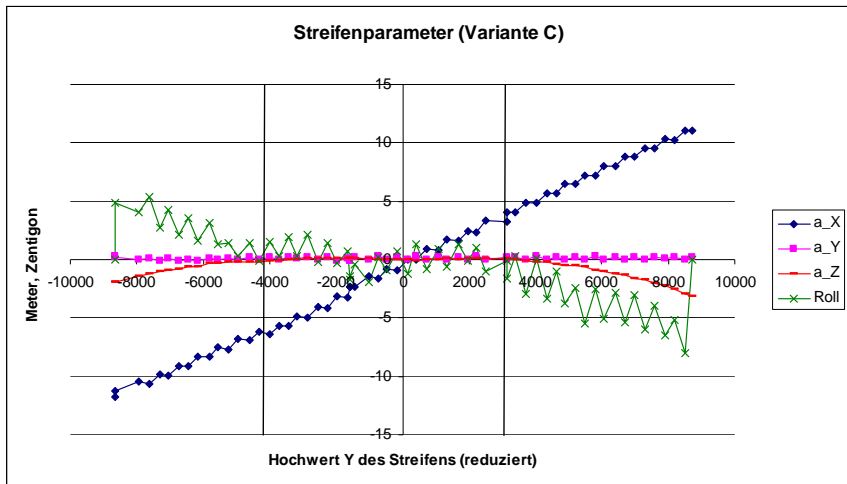


Abb. 2: Verlauf der Transformationsparameter für Streifenausgleichungsvariante C: Bestimmt wurden ein Verschiebungsvektor  $\mathbf{a}$  und ein Rollwinkel  $a_{Roll}$  pro Streifen. Die dargestellten Einheiten sind Meter bzw. Zentigon. Die Darstellung erfolgt sortiert nach den mittleren Hochwerten Y der in Ost-West-Richtung befliegenen Streifen. Die beiden senkrechten Striche begrenzen den Nord-Süd-Bereich, der durch die Höhenpassflächen abgedeckt wird. Besonders auffällig ist der lineare Verlauf der  $a_X$ -Werte von Süden nach Norden.

Die Darstellung erfolgt sortiert nach den mittleren Hochwerten der Streifen (von Süden nach Norden). Man sieht dabei deutlich, dass es bei der Z-Komponente und beim Roll-Winkel außerhalb des Höhenpassbereichs zu einem deutlichen Abdriften kommt. Das zeigt eine deutliche Korrelation der beiden bzw. eine Überparametrisierung außerhalb dieses Bereichs. Am bemerkenswertesten ist aber der Verlauf der X-Komponente von ca. -12m im Süden bis ca. +12m im Norden; also ca. 40cm pro Streifen. Solche großen Fehler der äußeren Orientierung sind unrealistisch und widersprechen der Überlagerung mit dem Situationslayer zu Beginn.

Dieser fast geradlinige Verlauf deutet auf einen Fehler in der Yaw-Komponente der mounting calibration hin, der durch die kontinuierlich wachsende Verschiebung in Flugrichtung kompensiert wird. Das leicht zitterige Verhalten ist Folge der unterschiedlichen Flugrichtungen und der fehlerhaften Pitch-Komponente. Während letztere bei horizontalem Gelände in erster Näherung zu 100% mit der Verschiebung in Flugrichtung korreliert ist, benötigt die Kompensation der Yaw-Komponente einen zusätzlichen affinen Parameter ( $a_{Yaw}$ ). Dieser beschreibt die Nicht-Orthogonalität zwischen der Flugrichtung und der Scannerablenkrichtung; d.h. ein dX wegen dY. Dieser Parameter wurde aus den vorhandenen X-Verschiebungen ( $a_x$ ) abgeschätzt zu  $a_{Yaw,Block} = 0.001313$ , was etwa einem Yaw-Fehler von ca.  $0.084^{\text{gon}}$  entspricht. Dieser Wert für  $a_{Yaw,Block}$  wurde für die Ausgleichungsvariante D als Konstante für alle Streifen eingeführt.

Folgende Abbildung zeigt analog zu Abb. 2 die Transformationsparameter jedes Streifens von Variante D. Sofort fällt auf, dass der lineare Verlauf der  $a_X$ -Werte verschwunden ist.

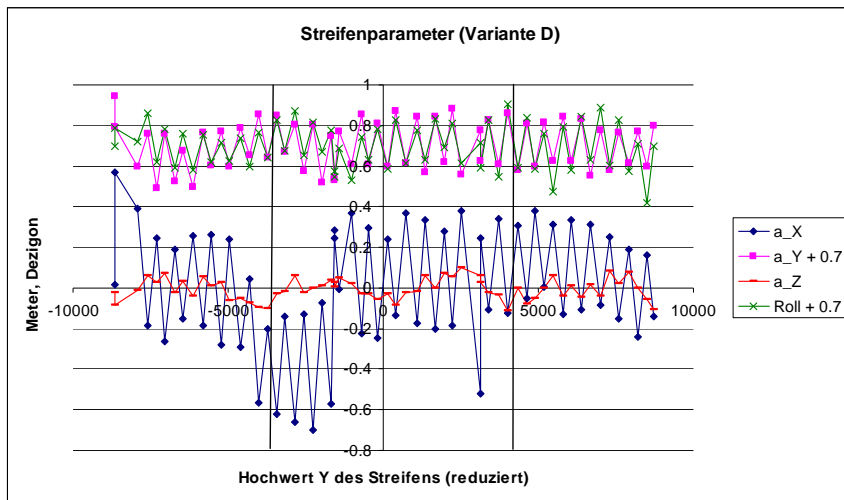


Abb. 3: Verlauf der Transformationsparameter für Streifenausgleichsvariante D: Bestimmt wurden ein Verschiebungsvektor  $\mathbf{a}$  und ein Rollwinkel  $a_{Roll}$  pro Streifen und zusätzlich wurde für den gesamten Block ein aus den  $a_X$ -Werten von Variante C abgeleiteter konstanter affiner Yaw-Parameter  $a_{Yaw,Block}$  berücksichtigt. Die dargestellten Einheiten sind Meter bzw. Dezigon. Die Darstellung erfolgt sortiert nach den mittleren Hochwerten Y der in Ost-West-Richtung befliegenen Streifen. Für eine deutlichere Unterscheidung wurden  $a_Y$  und  $a_{Roll}$  um 0.7 verschoben. Die beiden senkrechten Striche begrenzen den Nord-Süd-Bereich, der durch die Höhenpassflächen abgedeckt wird. Der lineare Verlauf der  $a_X$ -Werte von Variante C (siehe Abb. 2) ist verschwunden.

Die fiktiven Beobachtungen für die Verschiebungen der Streifen verursachen keine Widersprüche und alle Streifen erhalten nur mehr Verschiebungen im dm-Bereich. Auffällig in Abb. 3 ist das Zickzack-Muster bei allen vier Komponenten. Dies ist eine Folge der entgegengesetzten Flugrichtungen benachbarter Streifen. Diese wurden hier nicht berücksichtigt, da alle Streifen als nach Osten ausgerichtet behandelt wurden. Speziell bei der  $a_X$ -Verschiebung zeigt das Zickzack-Muster (Änderung von ca. 40cm von einem Streifen zum nächsten) den Effekt der Pitch-Komponente. Die für große Teile des gesamten Blocks annähernd konstanten Werte von  $a_X$ ,  $a_Y$ ,  $a_Z$  und  $a_{Roll}$  deuten darauf hin, dass die mounting calibration während des Fluges annähernd konstant geblieben ist. Weiters fällt eine deutliche Korrelation von  $a_Y$  und  $a_{Roll}$  auf. Bei exakt horizontalem Gelände und horizontalem Flug wären sie sogar 100% korreliert. Offensichtlich ist zumindest das Gelände ein wenig bewegt, sodass  $a_{Roll}$  bestimmt werden kann und wie Tab. 1 zeigt, hat  $a_{Roll}$  einen positiven Effekt auf RMS (Z).

**Schlussfolgerung.** Dieses Beispiel macht deutlich, wie wichtig ein affiner Parameter in Flugrichtung ist, um den Effekt einer falschen Yaw-Komponente der mounting calibration zu

kompensieren. Ohne diesen Parameter würden die Streifen bei Berechnung ohne Lagepassinformation unrealistisch große Lageverschiebungen erhalten. Bei Berechnung mit Lagepassobjekten würden an diesen sehr großen Widersprüche auftreten.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Ein sehr einfaches Modell für die ALS-Streifenausgleichung ohne GNSS-IMU-Trajektorien Daten wurde präsentiert. Es verwendet fünf Parameter pro Flugstreifen, die speziell die Fehler in der mounting calibration kompensieren: ein 3D-Verschiebungsvektor  $\mathbf{a}$ , ein Rollwinkel  $\alpha_{Roll}$  und ein affiner Yaw-Parameter  $\alpha_{Yaw}$ . Obwohl mit einer ALS-Streifenausgleichung ohne GNSS-IMU-Trajektorien Daten prinzipiell Nachteile verknüpft sind (Dynamik wird nicht berücksichtigt und Abbildungsgleichung ist nicht rigoros) und das präsentierte Modell unter einschränkenden Annahmen aus dem rigoros Modell abgeleitet wurde (Gelände und Flug sind horizontal), konnte beim Beispieldatensatz bestehend aus 61 Flugstreifen eine bemerkenswerte Genauigkeitssteigerung erzielt werden. Die RMS-Werte von korrespondierenden LSM-Punkten in den Streifen konnten besonders in den Lagekoordinaten (X/Y) von (0.353/0.127 [m]) auf (0.036/0.036 [m]) verbessert werden. Weiters wurde gezeigt, dass der affine Parameter essenziell ist, um den Fehler der Yaw-Komponente der mounting calibration zu kompensieren. Da ohne GNSS-IMU-Trajektorien Daten die Dynamik der Datenentstehung nicht berücksichtigt werden kann, ist eine gleichmäßige Verteilung der Verknüpfungspunkte über die Streifen sehr wichtig.

Die Herleitung des Modells ging von horizontalem Gelände und ruhiger geradliniger Befliegung aus. In zukünftigen Arbeiten soll daher näher untersucht werden, wie gut das präsentierte Modell bei unruhigen Befliegungen und bei bewegtem Gelände angewendet werden kann bzw. welche Adaptionen notwendig sind. Dazu werden Datensätze mit vorhandener GNSS-IMU-Trajektorie einmal mit und einmal ohne Berücksichtigung der Trajektorie einer Streifenausgleichung unterworfen.

## 5 Literaturverzeichnis

- BURMAN, H., 2000: Adjustment of laser scanner data for correction of orientation errors. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 33, pp. 125–132.
- CROMBAGHS, M.J.E.; BRÜGELMANN, R. & DE MIN, E.J., 2000: On the adjustment of overlapping strips of laseraltimeter height data. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 33, pp. 230–236.
- CSANYI, N. & TOTH, CH.K., 2007: Improvement of lidar data accuracy using lidar-specific ground targets. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, April 2007, pp. 385–396.
- FILIN, S., 2001: Recovery of systematic biases in laser altimetry using natural surfaces. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, 3/W4, pp. 85–91, Annapolis, MD, USA.
- FILIN, S. & VOSSelman, G., 2004: Adjustment of airborne laser altimetry strips. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXV, B/1, pp. 555–560, Istanbul, Turkey.

- FRIESS, P., 2006: Toward a rigorous methodology for airborne laser mapping. Proceedings International Calibration and Orientation Workshop EuroCOW 2006, Castelldefels, Spain, 25–27 January, 7 p. (on CDROM).
- FRIITSCH, D. & KILIAN, J., 1994: Filtering and calibration of laser scanner measurements, ISPRS Commission III Symposium, Munich, pp. 227-234
- KAGER, H., 2004: Discrepancies between overlapping laser scanner strips – Simultaneous fitting of aerial laser scanner strips. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXV, pp. 555-560
- KAGER, H. & KRAUS, K., 2001: Height discrepancies between overlapping laser scanner strips. Proceedings of Optical 3D Measurement Techniques V, October, Vienna, Austria, pp. 103-110.
- KILIAN, J.; HAALA, N. & ENGLISH, M., 1996: Capture and evaluation of airborne laser scanner data, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXI, pp. 383-388.
- RESSL, C.; KAGER, H. & MANDLBURGER, G., 2008: Quality Checking Of ALS Projects Using Statistics Of Strip Differences, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXVII, pp. 253 - 260.
- SKALLOUD, J., 2007: Reliability of Direct Georeferencing - Beyond the Achilles' Heel of Modern Airborne Mapping. Photogrammetric Week '07, Fritsch (editor), pp. 227-241
- SKALLOUD, J. & LICHTI, D., 2006: Rigorous approach to bore-sight self-calibration in airborne laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 61, pp. 47–59
- VOSSELMAN, G. & MAAS, H.-G., 2001: Adjustment and filtering of raw laser altimetry data. Proceedings OEEPE Workshop on Airborne Laser scanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models. OEEPE Publication, vol. 40, pp. 62–72. Stockholm, Sweden.



# Großflächige Waldüberwachung in Sibirien unter Verwendung von ALOS PALSAR Winter Kohärenzen und Sommer Intensitäten

CAROLIN THIEL<sup>1</sup>, CHRISTIAN THIEL<sup>2</sup>, JOHANNES REICHE<sup>3</sup>,  
REIK LEITERER<sup>4</sup> & CHRISTIANE SCHMULLIUS<sup>5</sup>

*Zusammenfassung: Um großflächige Walduntersuchungen durchzuführen, hat sich in den letzten Jahren der Einsatz von Fernerkundungsdaten, speziell von Radardaten stark bewährt, um aktuelle Waldbestände und Waldflächenveränderungen (Abholzung, Waldbrände, Sturmschäden, Insektenbefall etc.) zu erfassen und zu überwachen. In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass eine deutliche Unterscheidung zwischen Wald und Nichtwaldgebieten gemacht werden kann, wenn ALOS PALSAR Sommerintensitäten und ALOS PALSAR Winterkohärenzen zum Einsatz kommen.*

## 1 Einleitung

Für die Erfassung von aktuellen Waldbeständen und Waldflächenveränderungen (Abholzung, Waldbrände, Sturmschäden, Insektenbefall etc.) sowie Biomasseableitungen hat sich die Eignung von Radardaten innerhalb der letzten Jahre erwiesen (LECKIE & RANSON 1998, KASISCHKE et al. 1992, YATABE & LECKIE 1992, RIGNOT et al. 1997, DOBSON et al. 1992, ISRAELSSON et al. 1994, SANTORO et al. 2006). Insbesondere für die Aktualisierung von Forstinventurdatenbanken stellte sich heraus, dass Radardaten mit geringer Frequenz von besonderer Bedeutung sind. Zum Beispiel erwiesen sich L-Band SAR Daten des Japanischen Satelliten JERS-1 für die Kartierung von Waldflächen im borealen Raum als geeignet. Radarrückstreuung sowie Interferometrische Kohärenz konnten erfolgreich getestet werden. Mit dem Start von ALOS PALSAR konnten jedoch neue Dimensionen der satellitengetragenen SAR Datenauswertung eröffnet werden. Im Vergleich zum Vorgänger JERS-1 bietet PALSAR eine höhere Genauigkeit in der Bildradiometrie, Geometrie und Orbitbeständigkeit. Die kontrollierte interferometrische Baseline in Kombination mit dem Akquisitionsplan für das boreale Gebiet erweitern das Untersuchungspotential von interferometrischen SAR Daten in dieser Region. Auch durch die synchrone Aufnahme verschiedener Polarisationen ist die Verwendung dieser Daten für Walduntersuchungen von enormem Interesse.

In der vorliegenden Arbeit wird das Potential der synergetischen Verwendung von Rückstreuintensitäten und interferometrischer Kohärenz für großflächige Walduntersuchungen in Sibirien analysiert. Von besonderem Interesse ist der Informationsgewinn durch die interferometrische Kohärenz.

1) Carolin Thiel, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fernerkundung, Grietgasse 6, 07743 Jena, Deutschland E-mail: Carolin.Thiel@uni-jena.de

2) Christian Thiel, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fernerkundung, Grietgasse 6, 07743 Jena

3) Johannes Reiche, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fernerkundung, Grietgasse 6, 07743 Jena

4) Reik Leiterer, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fernerkundung, Grietgasse 6, 07743 Jena

5) Christiane Schmullius, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fernerkundung, Grietgasse 6, 07743 Jena

## 2 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet befindet sich in Zentralsibirien, im Irkutsker Oblast (siehe Abbildung 1). Es umfasst eine Gesamtfläche von ca. 90.000 km<sup>2</sup>. Das mittlere sibirische Plateau im südlichen Teil des Gebietes ist durch eine Berglandschaft mit Höhen von bis zu 1700 m gekennzeichnet. Der nördliche Teil vom Irkutsker Oblast weist hingegen nur eine maximale Höhe von ca. 500 m auf. Im Osten grenzt der Baikalsee an das Territorium. Vorrangig Taiga (Fichte, Birke, Pappel, Kiefer und Lärche etc.) dominieren in den Wäldern. Insgesamt beträgt die Waldfläche ca. 82% des Gebietes. Kontinentales Klima prägt die Region. Die jährliche Niederschlagsmenge überschreitet selten die 450 mm Grenze. Die Winter sind sehr kalt und trocken, dagegen die Sommer warm und niederschlagsreich.

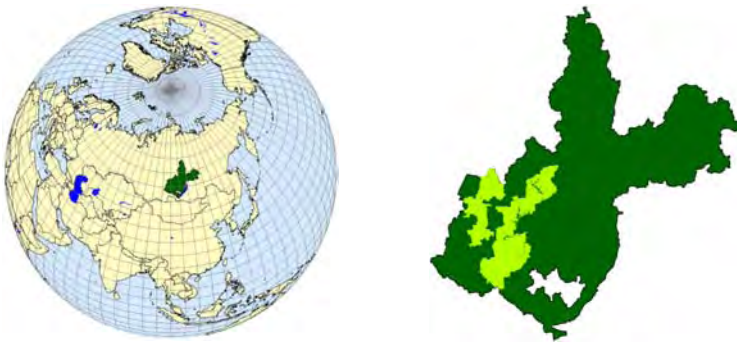


Abb. 1: Darstellung des Untersuchungsgebietes (hellgrün) in Zentralsibirien

## 3 Methodenvorstellung

Ziel dieser Untersuchung ist die Evaluierung des synergetischen Potentials von Rückstreuintensitäten und interferometrischer Kohärenz für großflächige Waldüberwachungen in Sibirien. Gestörte Areale wie Brand- oder Rodungsflächen sollten möglichst genau von intakten Waldflächen und anderen Landbedeckungstypen unterschieden werden. Zu diesen zählen unter anderem die Klassen Landwirtschaft, Siedlungs- und Bergbauregionen sowie offene Wasserflächen. Zur Evaluierung des Potentials der Synergie aus Intensität und Kohärenz wurde eine Signaturanalyse durchgeführt. Für die SAR Datensätze (Intensitäten FBD HH/HV & HH Kohärenz) wurden eine pixelbasierte Klassensignaturanalyse sowie eine Trennbarkeitsstudie durchgeführt. Zusätzlich wurden Merkmalsraumdarstellungen (feature space plots) generiert. Die entsprechenden Klassen sind zu unterteilen in „alte Rodungsfläche“, „rezente Rodungsfläche“, „Brandfläche“, „Wald“, „Ackerland“, „Wasser“ sowie „Siedlung“. Die Testflächen in den einzelnen Klassen wurden aus hochauflösenden optischen Daten ausgewählt. Eine Rodungsfläche fiel in die Klasse „alte Rodungsfläche“, wenn eine entsprechende Wiederbewaldung (Bedeckung mit jungem Forst >50%) identifiziert werden konnte.

## 4 SAR Daten

Die Radarrückstreuintensitätsdaten (FBD HH/HV) wurden während der ALOS Zyklen 12 und 13 im Sommer 2007 akquiriert. Die Pfadnummern reichen von 460 bis 474. Die verwendeten Daten lagen als sogenannte K&C Streifen vor – ein spezielles Datenprozessierformat, welches im Rahmen der ALOS Kyoto und Carbon Initiative entwickelt wurde (SHIMADA et al. 2008). Die K&C Streifen sind Daten mit der originalen PALSAR Breite von 70 km, allerdings mit einer Streifenlänge von mehreren PALSAR Szenen. Diese Länge beträgt in der Regel mehr als 1.000 km. Weiterhin wurde die geometrische Auflösung in Ground Range durch ein Multilookverfahren um den Faktor 4 im Vergleich zu den original FBD Daten auf 50 m x 50 m reduziert. Hierdurch wurde die erhebliche Reduzierung von Speckle erreicht.

Die Daten werden in Slant Range Geometrie geliefert. Die Prozessierkette umfasst radiometrische Kalibrierung, Orthorektifizierung, topographische Normalisierung (STUSSI et al. 1995) und Mosaikierung (siehe Abbildung 2, linkes Bild).

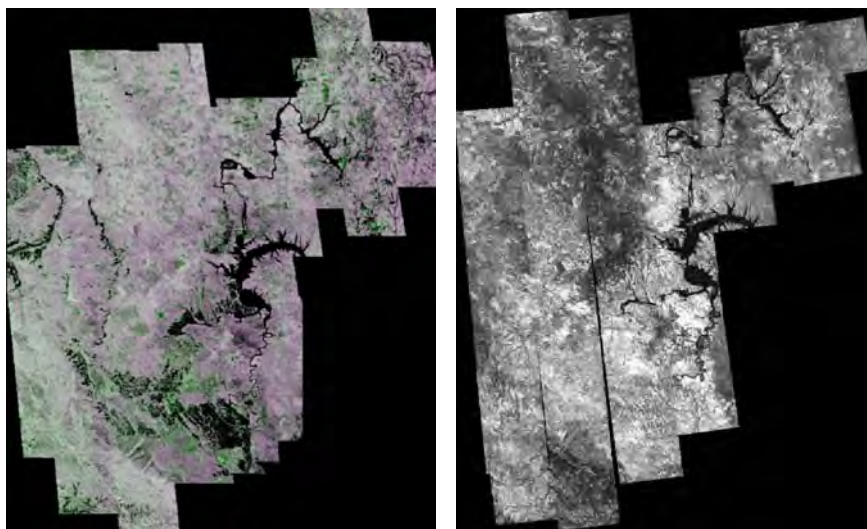


Abb. 2: PALSAR Mosaike. Links: Intensitäten (HV/HH/HV); Rechts: interferometrische Kohärenz

Für die Berechnung der interferometrischen Kohärenz wurden Standard Level 1.1 FBS Szenen mit den Pfadnummern zwischen 461 und 473 verwendet. Während der Winter 2006/2007 (ALOS Zyklen 8 und 9) und 2007/2008 (ALOS Zyklen 16 und 17) wurden insgesamt 43 Paare aufgenommen. Jedes Datenpaar stammt von zwei aufeinander folgenden Zyklen mit einer temporalen Baseline von je 46 Tagen. In beiden Wintern lagen die Temperaturen stetig weit unter 0°C, Wetterbedingungen, die für eine Verwendung der Kohärenz ideal sind. Die



interferometrische Prozessierung beinhaltet die SLC Co-Registrierung sowie common-band Filterung in Range und Azimuth. Alle SAR Szenen (K&C Intensitäten und Kohärenz) wurden mit Hilfe des SRTM Höhenmodells geokodiert. Die Pixelgröße beträgt 50 m x 50 m. Das Mosaik aus den 43 Kohärenzszenen ist auf der rechten Seite in Abbildung 2 dargestellt.

Ein erster Eindruck des Synergieeffektes aus Rückstreuintensitäten und Kohärenz kann in Abbildung 3 gewonnen werden. Diese RGB Komposite basiert auf den Rückstreuintensitäten aus HV und HH sowie der Kohärenz. Einige Landbedeckungsklassen können bereits visuell unterschieden werden. Wasser ist in schwarz dargestellt, nicht bewaldete Gebiete erscheinen in blau und Waldflächen treten in orange, gelb und hellgrün hervor. Diese Variationen basieren auf verschiedene Waldtypen und Biomassewerten. Der hellblaue Bereich in der Bildmitte stellt eine frische Brandfläche dar. Östlich davon, am Flusslauf, kann ebenfalls ein hellblauer Bereich ausgemacht werden. Dabei handelt es sich um die Stadt Novaja Igirma (ca. 11.000 Einwohner).

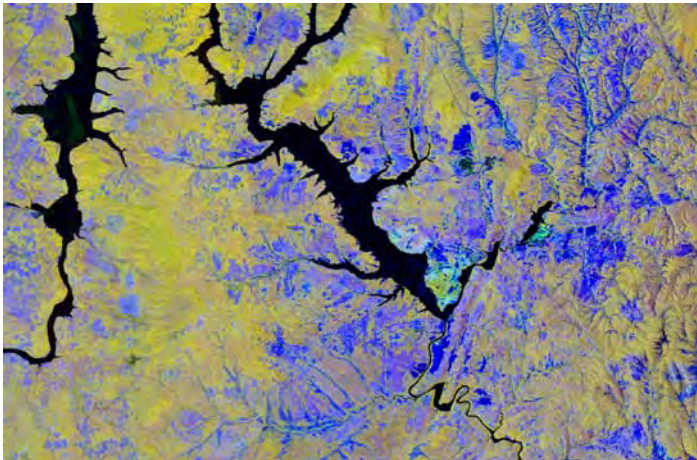


Abb. 3: Ausschnitt aus der RGB Komposite aus HV und HH Rückstreuintensitäten und Winter Kohärenzdaten HH (aus dem nordöstlichen Bereich des Untersuchungsgebietes)

## 5 Resultate und Diskussion

### 5.1 Analyse des Merkmalsraumes

Die Analyse des Merkmalsraums zielt auf eine Untersuchung der Grauwertverteilung hinsichtlich klassenrelevanter Cluster ab. Für diese Untersuchung wurden mehrere Gebiete mit verschiedenen Landbedeckungstypen ausgewählt. In dieser Arbeit sollen für zwei der Ausschnitte die Ergebnisse der Untersuchung näher erläutert werden. Um den Einfluss des jeweiligen Parameters zu bestimmen, wurden die Plots zuerst auf Basis der Intensitäten erstellt und nachträglich mit den Kohärenzen ergänzt. Der erste Ausschnitt (Abbildung 3) beinhaltet

Wasser, Ackerland, Siedlungen, rezente und ältere Rodungsflächen sowie Wald. Aufgrund der Verteilung der Landbedeckungstypen kann mit einem hohen Wertebereich der L-Band Intensitäten gerechnet werden. Diese Vermutung wird mit dem linken Bild der Abbildung 4 belegt. Sehr geringe Rückstreuintensitäten (A4, A3) entsprechen den Wasser- und Ackerflächen, hohe Rückstreuintensitäten (C2, C3) korrespondieren mit Wald und Siedlungen. Nur diese beiden Mischcluster können eindeutig unterschieden werden. Beide Intensitäten korrelieren deutlich miteinander.

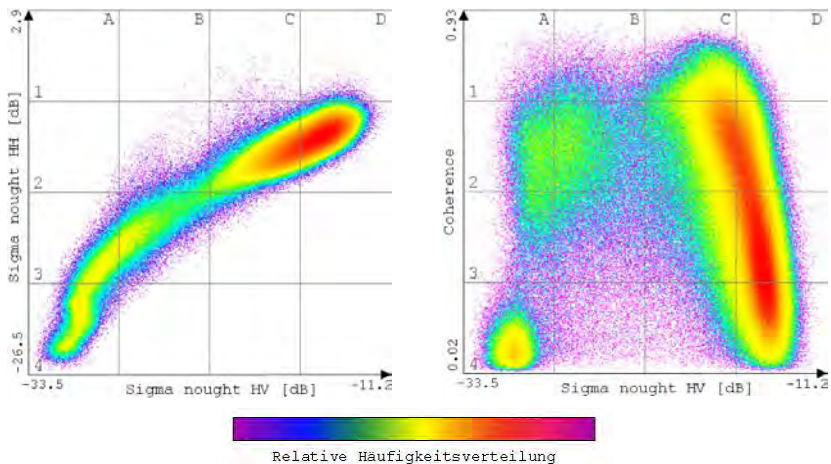


Abb. 4: links: Verteilung der Grauwerte aus HH und HV Intensitäten im Merkmalsraum; rechts: Verteilung der Intensitätsgrauwerte aus HV gegen die Kohärenz im Merkmalsraum

Wird die interferometrische Kohärenz einbezogen (rechtes Bild in Abbildung 4), kann eine Unterscheidung zwischen den einzelnen Klassen deutlicher wahrgenommen werden. Demnach können hier drei bis vier Cluster unterschieden werden. In A4 ist die Klasse Wasser deutlich abgrenzbar. Wasser (falls nicht gefroren) weist geringe Kohärenz- und Rückstreuwerte (L-HV) auf. Der Cluster mit hoher Kohärenz und geringen Rückstreuwerten (A2, B2) ist der Klasse Ackerland zuzuweisen, welche im Winter stabil ist und im Sommer geringe bis mittlere Rückstreuwerte besitzt. Der langgestreckte Cluster im rechten Bereich (hohe Rückstreuwerte im L-HV) und geringe bis hohe Kohärenz beinhaltet die restlichen Klassen. Die Klasse Wald siedelt sich in den Bereichen D3 und D4 an. Rodungsflächen liegen zwischen C2 und D3. Eine klare Trennung zwischen Wald und Rodungsflächen kann nicht erfolgen, durch die Wiederbewaldung sind die Übergänge fließend. Siedlungsflächen sollten mittlere bis hohe Kohärenz- und Rückstreuwerte besitzen. Möglicherweise wurde jedoch die Kohärenz durch anthropogene Eingriffe, wie Schneeabseilung, reduziert.

Um deutlichere Aussagen über die spezifischen Signaturen von Wald und rezenten Rodungsflächen zu erlangen, wurde ein weiterer Ausschnitt gewählt, der explizit diese beiden

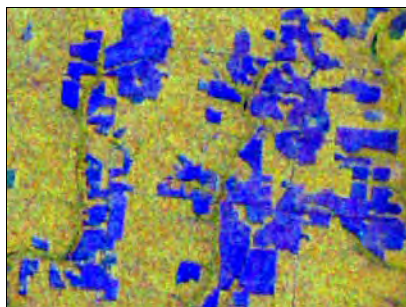


Abb. 5: Ausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet zur Signaturanalyse Wald/ Rodungsflächen (RGB wie Abb. 3)

Klassen näher betrachtet (Abbildung 5). Rezent Rodungsflächen treten in dunkelblau deutlich hervor und können gut gegen die hellgrüne Waldklasse abgegrenzt werden. Dieser Kontrast sollte ebenfalls im Merkmalsraum deutlich sein. Abbildung 6 (linkes Bild) zeigt den Merkmalsraum des Ausschnittes in Abbildung 5 der Rückstreuintensitäten HV und HH. Die zwei Klassen „Wald“ und „rezente Rodungsflächen“ sind in zwei Punktwolken wieder zu finden, wobei die geringen Intensitätswerte der Klasse „rezente Rodung“ angehören. Eine Trennlinie könnte zwischen A1 nach D4 gezogen werden. Anhand dieses Beispiels wäre eine Trennung basierend auf den Intensitäten möglich, jedoch gibt es auch Bereiche, in denen die

Unterscheidung nicht so eindeutig ausfällt. Die Hinzunahme der Kohärenz führt zu einer klaren Trennbarkeit zwischen beiden Klassen.

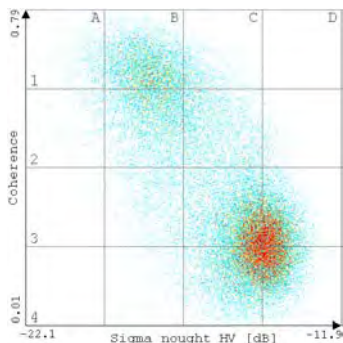
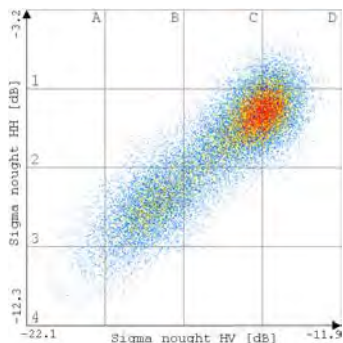


Abb. 6: links: Merkmalsraum aus Abbildung 5 (HV vs. HH); rechts: Merkmalsraum aus Abbildung 5 (HV vs. Kohärenz HH)

## 5.2 Signaturanalyse

In Abbildung 7 sind die Signaturen der einzelnen Klassen visualisiert. Im linken Bild korrespondieren die Signaturen mit den Rückstreuintensitäten, im rechten mit den Kohärenzen. Für jede Landbedeckungsklasse wurden 20 Stichproben (jeweils 50-200 Pixel) ausgewählt. Die Stichproben wurden repräsentativ über das gesamte Untersuchungsgebiet verteilt. Der Mittelwert sowie die Standardabweichungen der einzelnen Klassen (Fehlerindikation) wurden klassenbasiert berechnet, indem alle Pixelwerte einbezogen wurden.

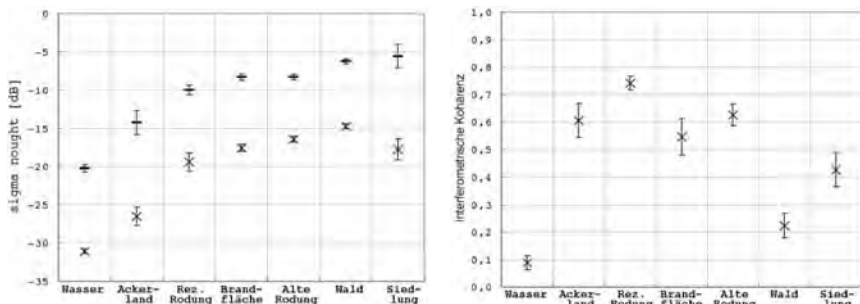


Abb. 7: links: Signaturanalyse für Intensitäten HH (-) und HV (x); rechts: Signaturanalyse für interferometrische Kohärenz

Die geringe Standardabweichung der homogenen Klassen (z.B. Wasser, Wald etc.) liefert den Beleg für einen geringen Einfluss des Speckle (siehe oben). Wie bereits vermutet, weist Wasser die geringsten Rückstreuintensitäten auf. Die Trennung aller Klassen auf Grundlage der Intensitäten scheint unproblematisch (linkes Bild in Abbildung 7). Sogar die Klasse „Ackerland“ kann trotz der hohen Standardabweichung gut von den anderen Klassen separiert werden, da die Grauwerte aus der Kreuzpolarisation in keinem Fall mit anderen Klassen überlappen. Die vier forstorientierten Klassen „rezente Rodungsfläche“, „Brandflächen“, „alte Rodungsfläche“ und „Wald“ zeichnen sich durch ähnliche Signaturen aus, obgleich die rezenten Rodungen und Wald unterschiedliche Rückstreuintensitäten besitzen und somit gut voneinander trennbar sein sollten. Eine eindeutige Unterscheidung der genannten waldähnlichen Klassen ist jedoch nicht möglich. Durch die Integration der interferometrischen Kohärenz könnte dieses Problem behoben werden. Im rechten Bild der Abbildung 7 ist eindeutig zu erkennen, dass Wald (mit Ausnahme von Wasser) die geringste Kohärenz aufweist. Ebenso können rezente und alte Rodungsflächen mit Hilfe der Kohärenzinformation besser voneinander unterschieden werden und sogar die Signatur der Brandflächen überlappt nicht mit jener der aktuellen Rodungen. Sommerkohärenzen könnten sich besser für die Unterscheidung von Siedlungsflächen anbieten.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Analyse der Signaturen die Auswertung der oben diskutierten Merkmalsraumverteilungen bestätigen.

### 5.3 Trennbarkeitsanalyse

Eine Trennbarkeitsanalyse schließt die vorangegangenen Untersuchungen ab und quantifiziert die Ergebnisse. Die Tabellen 1 und 2 fassen die Trennbarkeit der einzelnen Klassen zusammen, wobei die Werte in Tabelle 1 nur auf den Intensitäten basieren und die Trennbarkeiten in Tabelle 2 die Kohärenz berücksichtigen. Als Trennbarkeitsmaß wurde die nicht-lineare normalisierte Jeffries-Matusita Distanz gewählt (1,0 = Trennung möglich; 0,0 = keine Trennung möglich). Die Analyse erfolgte auf Pixelebene. Es wurden die gleichen Stichproben wie für die Signaturanalyse verwendet. Die mittlere Trennbarkeit auf Basis der Intensitäten beträgt 0,88. Einige Klassen wie „Wasser“, „Ackerland“ und „Wald“ können dabei sehr gut von den anderen

separiert werden, „Siedlung“ und „alte Rodungsflächen“ hingegen eher weniger. Klassenpaarungen mit einer Trennbarkeit kleiner 0,8 wurden fett gedruckt. Ein Beispiel ist die geringe Trennbarkeit zwischen alten Rodungen und Brandflächen.

Tab. 1: Normalisierte JM Distanz zwischen 7 Klassen basierend auf den Intensitäten (Mittel = 0,88)

	Siedlung	Acker	Brandfläche	Rez. Rodung	Alte Rodung	Wald
Wasser	1,00	0,87	1,00	1,00	1,00	1,00
Siedlung		0,93	<b>0,74</b>	<b>0,79</b>	0,83	0,83
Acker			0,99	0,91	1,00	1,00
Brandfläche				<b>0,65</b>	<b>0,54</b>	0,93
Rez. Rodung					<b>0,71</b>	0,94
Alte Rodung						0,86

Tab. 2: Normalisierte JM Distanz zwischen 7 Klassen basierend auf den Intensitäten und der Kohärenz (Mittel = 0,95)

	Siedlung	Acker	Brandfläche	Rez. Rodung	Alte Rodung	Wald
Wasser	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Siedlung		0,95	0,81	0,97	0,92	0,90
Acker			1,00	0,94	1,00	1,00
Brandfläche				0,88	<b>0,75</b>	0,95
Rez. Rodung					0,84	1,00
Alte Rodung						0,99

Die Verwendung der Kohärenz verbessert eindeutig die Trennbarkeit von 0,88 auf 0,95 (zur Beachtung: die Jeffries-Matusita Distanz ist ein nicht lineares Maß). Jedoch können die Klassen „alte Rodungen“ und „Brandflächen“ trotz der Kohärenz nur unwesentlich besser voneinander getrennt werden. Im Allgemeinen kann die Trennung der waldähnlichen Klassen durch Einbindung der Kohärenz verbessert werden.

## 5.4 Klassifikationsergebnisse

Nach vorangegangenen Analysen wurden die SAR Daten (Intensität und Kohärenz) klassifiziert, um eine großflächige Waldüberwachung vorzunehmen. Folgende Klassen wurden vom Endnutzer bestimmt: Wald, Nicht-Wald sowie spärlicher bzw. nachwachsender Wald. Somit fallen die oben beschriebenen Klassen „rezente Rodung“, „Ackerland“, „Wasser“ und „Siedlungsflächen“ in die Klasse „Nicht-Wald“. Alte Rodungsflächen werden in die neue Klasse „nachwachsender Wald“ überführt. Die Klassifikation basiert auf einer objektorientierten Segmentierung und wurde mittels des Nearest Neighbor Algorithmus durchgeführt. Weitere Informationen zum Klassifikationsalgorithmus sind in (THIEL et al. 2006) beschrieben. Bislang wurden ausschließlich ASAR AP Intensitäten verwendet, welche jedoch eine hohe manuelle Nachklassifikation erforderten, um die geforderte thematische Genauigkeit von 90% zu erreichen. Mit Verwendung von PALSAR Intensitäten und Kohärenzen konnte dieser zeitlich kostenintensive Aufwand eingespart werden. Abbildung 8 zeigt das klassifizierte Untersuchungsgebiet, sowie einen Ausschnitt daraus. Betrachtet man die erzielte Klassifikation mit einer Genauigkeit von 90,87%, wird deutlich, dass PALSAR Daten für eine großflächige Waldüberwachung in Sibirien viel versprechende Resultate liefern. Besonders durch die Hinzunahme von Winterkohärenzen wird eine schnelle und kostenreduzierte Kartenerstellung möglich. Aufgrund der ALOS Aufnahmestrategie können Kohärenzdaten für das gesamte Areal

Sibiriens erstellt werden. Vorausgesetzt der ALOS Nachfolgesensor ALOS 2 behält diese Strategie bei, können weitere Langzeitanalysen im borealen Raum gewährleistet werden.

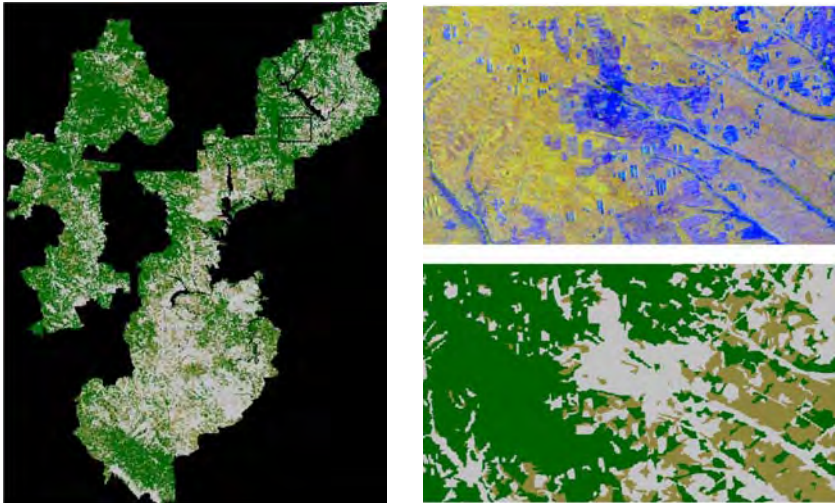


Abb. 8: Klassifikationsergebnis für das gesamte Untersuchungsgebiet (Wald: grün, Nicht-Wald: grau, Spärlicher Wald: ocker) (links) sowie eines Ausschnittes (rechts) (RGB SAR Komposite wie Abb. 2)

## 6 Fazit und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass sich PALSAR Daten für eine großflächige Waldkartierung im borealen Raum sehr gut eignen. Neben Wald konnten auch andere Landbedeckungsklassen mit hoher Genauigkeit kartiert werden.

Die PALSAR K&C Daten wurden durch die interferometrische Kohärenz ergänzt, ein Produkt, welches aus bereits archivierten PALSAR Daten generiert werden kann. Diese Kohärenzdaten korrelieren nicht mit den Intensitäten und leisten somit Zusatzinformationen zum K&C Datensatz.

Obwohl dieser Ansatz nicht neu ist (JERS-1 Daten), ist es jedoch aufgrund der ALOS Aufnahmestrategie erstmalig möglich, derartige Kohärenzdatensätze für das gesamte Sibirien zu erstellen. Diese Aufnahmestrategie sollte daher auch in späteren L-Band Missionen beibehalten werden. Eine kontinuierliche Waldüberwachung könnte somit in dieser Region gewährleistet werden.

## 7 Literaturverzeichnis

- SHIMADA, M.; ISOGUCHI, O. & ROSENQVIST, A., 2008: PALSAR CALVAL and generation of the continent scale mosaic products for Kyoto and Carbon Project, Proc. of IGARSS 2008, July 6-11, Boston, USA.
- LECKIE, D.G. & RANSON, K.J., 1998: Forestry applications using imaging radar, (Eds. F.M. HENDERSON & A.J. LEWIS, "Principles and applications of imaging radar"), 3rd edn, Wiley, New York, S. 435-510.
- KASISCHKE, E.; BOURGEOU-CHAVEZ, L.; FRENCH, N.; HARRELL, P. & CHRISTENSEN, N., 1992: Initial observations on using SAR to monitor wildfire scars in boreal forests, *Int. J. Remote Sensing*, **13** (18), S. 3495-3501.
- YATABE, S.M. & LECKIE, D.G., 1995: Clearcut and forest-type discrimination in satellite SAR imagery, *Canadian J. Remote Sensing* **21** (4), S. 456-467.
- RIGNOT, E.; SALAS, W.A. & SKOLE, D.A., 1997: Mapping deforestation and secondary growth in Rondonia, Brazil, using imaging radar and thematic mapper data, *Remote Sensing of Environment*, **59**, S. 167-179.
- DOBSON, M.C.; ULABY, F.T.; LE TOAN, T.; BEAUDOIN, A.; KASISCHKE, E.S. & CHRISTENSEN, N., 1992: Dependence of radar backscatter on coniferous forest biomass, *IEEE Trans. Geosc. and Rem. Sens.* **30** (2), S. 412-415.
- ISRAELSSON, H.; ASKNE, J. & SYLVANDER, R., 1994: Potential of SAR for forest bole volume estimation, *Int. J. Remote Sensing* **15** (14), S. 2809-2826.
- 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**, S. 3425-3454.
- STUSSI, N.; BEAUDOIN, A.; CASTEL, T. & GIGORD, P., 1995: Radiometric correction of multi-configuration 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, S. 347-467.
- THIEL, C.; DREZET, P.; WEISE, C.; QUEGAN, S. & SCHMULLIUS, C., 2006: Radar Remote Sensing for the Delineation of Forest Cover Maps and the Detection of Deforestation, *Forestry - An International Journal of Forest Research*, **79** (5), S. 590-597.

## **Analyse urbaner Gebiete mit optischen Bildern und SAR-Bildern sehr hoher Auflösung**

**JAN D. WEGNER<sup>1</sup>, STEFAN AUER<sup>2</sup> & UWE SÖRGEL<sup>1</sup>**

*Zusammenfassung: Aufnahmen aktueller SAR-Sensoren ermöglichen aufgrund sehr hoher geometrischer Auflösung die Analyse urbaner Gebiete. Die Szenenanalyse wird jedoch durch SAR-spezifische Effekte wie Foreshortening, Layover und Shadowing erschwert. Die Interpretation der SAR-Bilder kann durch die kombinierte Auswertung mit optischen Luftbildern erleichtert werden. In diesem Beitrag werden erste Konzepte zur Detektion und Modellierung von Brücken und Gebäuden mit einer Kombination von SAR-Bildern und optischen Bildern vorgestellt. SAR-spezifische Effekte werden mit Hilfe simulierter SAR-Bilder verdeutlicht.*

### **1 Einleitung**

Aktuelle satellitengestützte SAR-Sensoren (TerraSAR-X, COSMO-SkyMed) sind in der Lage, SAR-Bilder mit einer geometrischen Auflösung von bis zu einem Meter am Boden aufzunehmen. Luftgestützte SAR-Sensoren (Memphis, Pamir, AeS-1, Ramses, Sethi) erzielen darüber hinaus noch erheblich höhere Auflösungen von deutlich unter einem halben Meter. Auf Grund dessen werden viele Details in urbanen Gebieten sichtbar, wie z.B. Straßen, Gebäude, Brücken und Bäume. Die Entwicklung von Ansätzen zur Detektion und Modellierung dreidimensionaler Objekte, insbesondere von Brücken und Gebäuden, ist deshalb viel versprechend.

Wegen der SAR-typisch schrägen Beleuchtung der Szene kommt es zu Effekten wie Überlagerungen (Layover), Verkürzungen (Foreshortening) und Verdeckungen (Shadowing). Diese Effekte sind vor allem in urbanen Gebieten stark ausgeprägt und erschweren die Interpretation der Szene. Da es sich beim SAR-Sensor um ein aktives System handelt, der unabhängig vom Sonnenlicht im Mikrowellenbereich arbeitet, geben SAR-Bilder außerdem keine spektrale Information von Objekten wieder. Es bietet sich daher an, SAR-Bilder mit zusätzlichen Daten wie topographischen Karten oder optischen Bildern kombiniert auszuwerten, um die automatische Szenenanalyse zu erleichtern.

In diesem Beitrag wird die kombinierte Auswertung von SAR-Bildern und optischen Luftbildern näher betrachtet. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Detektion und dreidimensionalen Modellierung von Brücken und Gebäuden.

1) Jan Dirk Wegner, Uwe Sörgel, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Leibniz Universität Hannover, Nienburger Str. 1, 30167 Hannover; E-Mail: {wegner, soergel}@ipi.uni-hannover.de}

2) Stefan Auer, Lehrstuhl für Methodik der Fernerkundung, Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München; E-Mail: Stefan.Auer@bv.tu-muenchen.de



## 2 Brücken in SAR-Bildern

Die Detektion und Zustandsüberwachung von Brücken ist von Interesse, da sie wichtige Bestandteile urbaner Infrastruktur sind. Um Brücken in SAR-Bildern automatisch zu erkennen, ist es notwendig, deren Erscheinungsbild genauer zu betrachten. Die Ausprägung einer Brücke im SAR-Bild hängt sowohl von den Aufnahmeparametern des SAR-Sensors als auch von speziellen Eigenschaften der Brücke ab. Wichtige Aufnahmeparameter sind die Orientierung des SAR-Sensors zur Brücke (Aspekt) und der Beleuchtungswinkel  $\theta$ . Je größer der Beleuchtungswinkel wird, d.h. je flacher der SAR-Sensor die Brücke beleuchtet, desto stärker treten Layover- und Shadowing-Effekte auf (siehe Kapitel 3). Brückeneigenschaften, die sich im SAR-Bild auswirken, sind die Brückenstruktur, das Material, die Höhe über Grund und die Umgebung der Brücke. Insbesondere die Umgebung der Brücke ist von Bedeutung, da diese mit der Brücke in Layover- und Schattenbereichen interagiert. So erscheinen Brücken über Wasser in SAR-Bildern anders als Brücken über Land.

### 2.1 Brücken über Wasser

In SAR-Bildern von Brücken über Wasser kommt es zu Mehrfachreflexionen des Radarsignals zwischen der Wasseroberfläche und der Brücke (Abb. 1, links), wenn sich der SAR-Sensor während der Aufnahme parallel zur Brücke fortbewegt hat. Dies führt zu mehrfachen Abbildungen einzelner Brückenteile im SAR-Bild, aus denen sich die Höhe der Brücke über Grund abschätzen lässt (ROBALO & LICHTENBERGER, 1999). Dieser Effekt tritt immer dann auf, wenn das Material in direkter Umgebung und unterhalb der Brücke das Radarsignal ohne große Intensitätsverluste reflektiert. Das mittlere Bild in Abb. 1 zeigt zwei Brücken über einem Kanal bei Dorsten. Aufgrund von Mehrfachreflexionen des Radarsignals erscheinen pro Brücke drei Streifen im Bild.

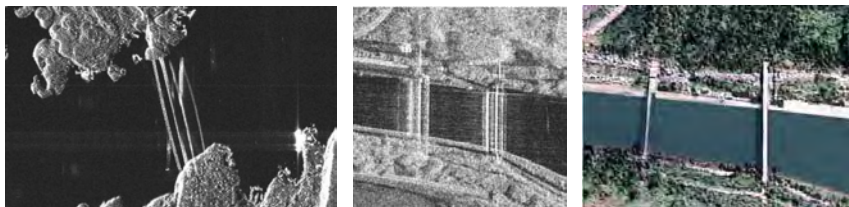


Abb. 1: Links: TerraSAR-X Bild einer Brücke bei Bergen (von links beleuchtet, in Bodengeometrie), Mitte: Einzelnes Amplitudenbild eines interferometrischen SAR-Bildpaares (InSAR) von zwei Brücken über einem Kanal bei Dorsten, aufgenommen mit dem Intermap SAR-Sensor Aes-1 (von rechts beleuchtet, in Bodengeometrie) (© Intermap), Rechts: Dreidimensionales Modell der Dorsten-Szene nach Fusion der InSAR-Daten mit einem optischen Luftbild

Da die Wasseroberfläche relativ glatt ist, wird das Signal entsprechend der Fresnelschen Formeln vom Sensor weg gerichtet reflektiert. Bei glatten Wasseroberflächen wird so kaum Signal zum Sensor zurück reflektiert und die Wasseroberfläche erscheint sehr dunkel im SAR-Bild. Trifft

das Signal nach der Reflexion auf der Wasseroberfläche auf ein weiteres Objekt, wie z.B. eine Brücke, werden Signalanteile diffus zum Sensor reflektiert. Ebenso kommt es vor, dass das Signal zunächst auf die Brücke trifft, von dort diffus auf die Wasseroberfläche reflektiert wird und dann zurück vom Sensor empfangen wird. Diese Zweifachreflexionen führen zum mittleren Streifen des mittleren Bildes in Abb. 1. Zum linken Streifen (Layover), mit der kürzesten Distanz zum Sensor, kommt es aufgrund direkter Rückstreuung des Signals von der Brückenfahrbahn oder anderen Strukturen auf der Brücke. Der rechte Streifen entsteht durch Dreifachreflexionen des Signals: Wasseroberfläche – Brücke – Wasseroberfläche oder Brücke – Wasseroberfläche – Brücke. Bei bekanntem Beleuchtungswinkel des Radarsignals kann mit Hilfe des Abstandes zwischen erstem und zweitem Streifen oder zweitem und drittem Streifen im Bild in Sensorgeometrie die Höhe der Brücke über der Wasseroberfläche bestimmt werden (1). Ist außerdem die absolute Brückenhöhe bekannt, kann die Wasserstandshöhe abgeleitet werden.

$$h = \Delta s / \cos(\theta) \quad (1)$$

Für die Erstellung eines Interferogramms und die anschließende Ableitung eines Höhenmodells sind Wasserflächen oft hinderlich, da kaum Signalanteile zum Sensor zurückgestreut werden. So wirkt sich Rauschen sehr stark auf die Interferogrammgenerierung aus und es entsteht keine einheitlich glatte Oberfläche im Höhenmodell. Außerdem erschweren Mehrfachreflexionen eine genaue Lagebestimmung der Brücke. Mit Hilfe einer Fusion von SAR-Bildern bzw. InSAR-Daten mit optischen Luftbildern kann Abhilfe geschaffen werden. Außerdem wird eine verbesserte Visualisierung der Brücken erzielt. Dabei wird die Höheninformation aus den interferometrischen Daten abgeleitet während die Lageinformation mit Hilfe der optischen Daten ermittelt wird (SOERGEL et al., 2007). Die Gewässerfläche wird im optischen Bild segmentiert und dann auf eine einheitliche Höhe gesetzt. Das Ergebnis ist ein dreidimensionales Modell der Brücke (Abb. 1, rechts) mit glatter Wasserfläche.

## 2.2 Brücken über Land

Brücken über Land prägen sich in SAR-Bildern anders aus als Brücken über Wasser (WEGNER & SOERGEL, 2008). Die für SAR-Bilder mit Brücken über Wasser typischen parallelen Linien, zurückzuführen auf Mehrfachreflexionen des Signals zwischen Wasseroberfläche und Brücke, treten bei Brücken über Land meistens nicht auf. Dieser Unterschied ist durch die Reflexionseigenschaften von Wasser und Land begründet. Während Wasseroberflächen das Signal gerichtet reflektieren, wird es an Landoberflächen diffus reflektiert. Die diffuse Reflexion des Signals hängt dabei vor allem von der Rauigkeit des Materials unter und um die Brücke herum ab (relativ zur Wellenlänge des Signals). Vergleicht man das SAR-Bild einer Brücke, die über Land mit Pflanzenbewuchs führt in Abb. 2, mit dem SAR-Bild einer Brücke über Wasser im linken Bild in Abb. 1, so sind die Unterschiede deutlich zu erkennen. Bei Brücken über Wasser werden verschiedene Teile der Brücke mehrfach im Bild abgebildet, woraus sich die Brückenhöhe mit (1) bestimmen lässt. Dies ist bei der in Abb. 2 dargestellten Brücke über Land nicht der Fall. Allerdings ist dort deutlich der Schatten der Brücken zu erkennen, der für eine Bestimmung der Brückenhöhe (siehe Kapitel 2.3) genutzt werden kann.

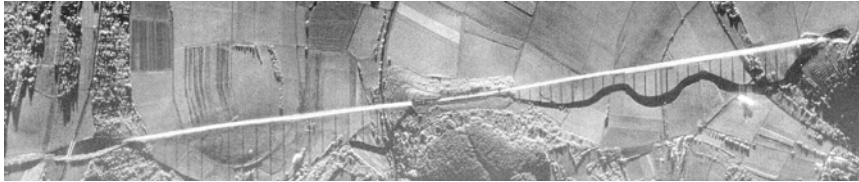


Abb. 2: SAR-Bild einer Eisenbahnbrücke bei Zellingen mit dem luftgestützten SAR-Sensor Memphis (von oben beleuchtet, in Bodengeometrie) (© FGAN-FHR)

Außerdem ist er für die Detektion der Brücke hilfreich, da der Schatten ein Hinweis auf ein dreidimensionales Objekt ist und so Brücken von Straßen unterscheidet. Wie in Abb. 2 zu sehen ist, folgt der Brückenschatten dem Verlauf des Geländes und kann so, bei bekannter Brückenhöhe und Beleuchtungswinkel, zur Abschätzung der Geländehöhe im Schattenrandbereich genutzt werden.

## 2.3 Höhenbestimmung

Nimmt man eine flache Wellenfront des Radarsignals und lokal ebenes Gelände an, kann die Höhe eines Objektes aus einem einzigen SAR-Bild geschätzt werden. Dazu wird zunächst das SAR-Bild von der Sensorgeometrie mit Hilfe eines Geländemodells in die Bodengeometrie überführt. Die Darstellung links in Abb. 3 zeigt schematisch, wie die Höhe  $h$  eines dreidimensionalen Objektes, z.B. der Eisenbahnbrücke in Abb. 2, mit Hilfe des Schattens POC und des Layovers PS bestimmt werden kann.

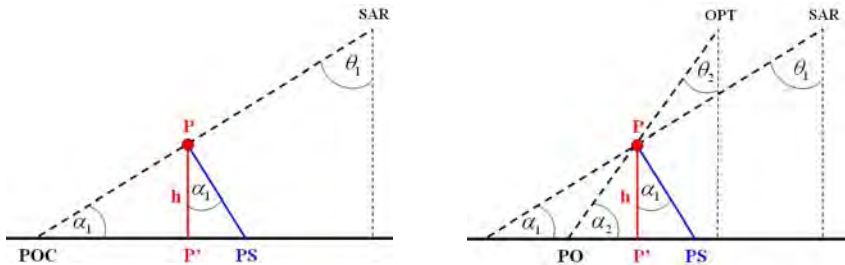


Abb. 3: Links: Höhenbestimmung eines dreidimensionalen Objektes aus einem einzigen SAR-Bild, Rechts: Höhenbestimmung eines dreidimensionalen Objektes mit Hilfe eines SAR-Bildes und eines optischen Bildes

P stellt in diesem Fall die Brücke mit der Höhe  $h$  dar. Der SAR-Sensor bildet die Brücke mit dem Beleuchtungswinkel  $\theta_1$  ab. Im SAR-Bild kommt es zum Layover-Effekt und so wird P auf PS abgebildet. Der Bereich zwischen P' und POC wird von der Brücke verdeckt und nicht vom Radarsignal beleuchtet. Dieser Bereich erscheint als Schatten im SAR-Bild. Die tatsächliche Position der Brücke P' wird nicht im SAR-Bild abgebildet. Mit Hilfe trigonometrischer Formeln lässt sich die Brückenhöhe aus der Distanz  $D$  zwischen PS und POC im Bild abschätzen (2).

$$h = D \frac{\tan(\alpha_1)}{\tan^2(\alpha_1) + 1} = D \frac{\sin(2\alpha_1)}{2} \quad (2)$$

Zu Testzwecken wurde die Höhe der Eisenbahnbrücke in Abb. 2 gemessen. Dafür wurde das Bild in Sensorgeometrie mit dem von der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) erstellten Höhenmodell (SRTM-3) auf den Boden projiziert. Im nächsten Schritt wurden Brücke und Schatten im SAR-Bild segmentiert. Daraufhin wurde der Abstand D zwischen der sensornahen Kante des Layoverbereichs und der sensornahen Kante des Brückenschattens gemessen und mit Messungen aus einem Feldvergleich verglichen (Tab. 1). Zur systematisch zu niedrig bestimmten Brückenhöhe aus dem SAR-Bild kommt es aufgrund des für diesen Zweck zu groben Höhenrasters des SRTM-Höhenmodells. Mit einem genaueren Höhenmodell, z.B. von der bayerischen Landesvermessung, könnten erheblich bessere Ergebnisse erzielt werden.

Tab. 1: Vergleich einiger aus dem Bild bestimmten Brückenhöhen mit den tatsächlichen Brückenhöhen (jeweils gemessen zwischen Erdboden und Unterkante der Fahrbahn)

Aus dem Bild bestimmte Höhen [m]	Tatsächliche Brückenhöhen [m]
18,17	23,66
18,21	19,28
14,52	16,73
12,38	16,11
12,73	15,83
<b>Standardabweichung: 3,46</b>	

Ist ein optisches Bild der Brücke vorhanden, kann die Brückenhöhe auch mit einer Kombination aus optischem Bild und SAR-Bild bestimmt werden (INGLADA & GIROS, 2004) (Abb. 3, rechts). Dafür werden zunächst beide Bilder mit einem Geländemodell orthorektifiziert. Für das SAR-Bild gelten wieder die gleichen Abbildungseigenschaften wie schon zuvor beschrieben. Im optischen Bild wird der Punkt P, der im SAR-Bild auf Punkt PS abgebildet wird, auf Punkt PO abgebildet. Ist der Aufnahmewinkel  $\theta_2$  des optischen Sensors bekannt und wird lokal ebenes Gelände angenommen, kann die Brückenhöhe aus dem Abstand D zwischen PO und PS bestimmt werden.

$$h = D \cdot \tan(\alpha_2) / (\tan(\alpha_1) \cdot \tan(\alpha_2) + 1) \quad (3)$$

Diese am Beispiel von Brücken untersuchten Möglichkeiten der Höhenbestimmung dreidimensionaler Objekte aus einzelnen SAR-Bildern oder aus der Kombination eines optischen Bildes und eines SAR-Bildes können auch für Gebäude genutzt werden (siehe Kapitel 4).

### 3 Brückensimulation

Um auftretende Effekte und den Einfluss der Sensorparameter auf deren Ausprägung im SAR-Bild systematisch zu untersuchen, liegen oft nicht genug SAR-Bilder der gleichen Szene vor. Außerdem sind SAR-Bilder häufig stark verrauscht und es tritt zusätzlich der Speckle-Effekt auf. Simulationsprogramme für die Erzeugung künstlicher SAR-Bilder können hier unterstützend wirken, da so deterministische Bildmerkmale von zufälligen Streueffekten unterschieden und Reflexionsbeiträge wie Einfach- oder Mehrfachreflexion geometrisch voneinander getrennt werden können. Des Weiteren lässt sich das Erscheinungsbild eines Objekts in Abhängigkeit des Einfallswinkels und Aspektwinkels anschaulich nachvollziehen, was im Folgenden anhand eines Simulationsergebnisses für die Brücke nahe Zellingen gezeigt wird. Die dazu nötigen Arbeitsschritte gestalten sich wie folgt: Zunächst wird ein 3D-Modell der Brücke erzeugt und in ein digitales Höhenmodell eingebracht, welches aus Daten der SRTM-Mission generiert worden ist (Abb. 4). Ein virtueller SAR Sensor, der die gleichen Abbildungseigenschaften aufweist wie ein reales SAR-System, beleuchtet im Anschluss den Objektraum unter der Verwendung unterschiedlicher Signaleinfallswinkel und Aspektwinkel, um künstliche Reflexionskarten zu erzeugen (AUER et al., 2008). Für die Approximation des Radarsignals werden dabei Ray-Tracing Algorithmen eingesetzt, bei denen die modellierte Szene anhand von Strahlen und unter der Berücksichtigung von Mehrfachreflexionen abgetastet wird (GLASSNER, 2002).

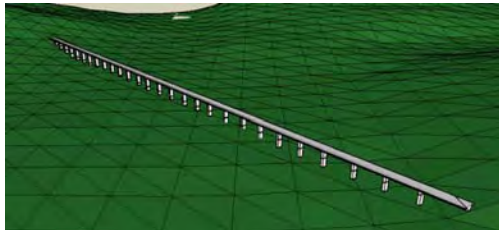


Abb. 4: 3D-Modell der Brücke bei Zellingen, eingefügt in ein Höhenmodell, das aus SRTM-3 Daten erzeugt wurde

In Abb. 5 sind Erscheinungsbilder der Brücke für verschiedene Sensorpositionen dargestellt. Insbesondere die unterschiedliche Ausprägung des Brückenschattens ist deutlich zu erkennen. Während der Schattenbereich für hohe Beleuchtungswinkel (hier  $75^\circ$ ) weiter von der Brücke entfernt liegt (Abb. 5, oben), nähert er sich der Brücke bei niedrigerem Beleuchtungswinkel (Abb. 5, Mitte) an (hier  $45^\circ$ ). Wird der Aspektwinkel des SAR-Sensors so gewählt, dass das SAR-Bild ungefähr längs des Brückenverlaufs aufgenommen wird, schmiegt sich der Schatten fast vollständig an die Brücke an (Abb. 5, unten). Helle Punkte an der Brücke bzw. am Ende der Brückenpfeiler ergeben sich durch Zweifachreflexion zwischen Boden und Pfeilern. Sichtbare Dreiecke innerhalb der simulierten Bilder werden durch das verwendete Oberflächenmodell verursacht, welches anhand einer Dreiecksvermaschung erzeugt worden ist.

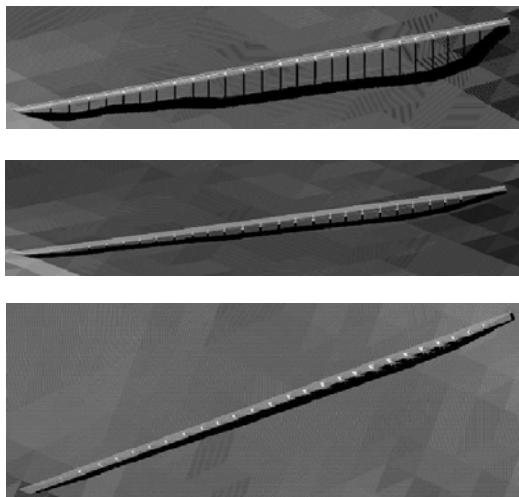


Abb. 5: Simulationsergebnis (in Sensorgeometrie, ohne Speckle) für die Brücke bei Zellingen, Oben und Mitte: Reflexionskarten für Beleuchtungswinkel von  $75^\circ$  bzw.  $45^\circ$  (von oben beleuchtet), Unten: Reflexionskarte für Aspektwinkeländerung von  $90^\circ$  gegenüber den ersten beiden Simulationen (von links beleuchtet, Beleuchtungswinkel  $45^\circ$ )

## 4 Gebäude in SAR-Bildern

Die Detektion und Modellierung von Gebäuden in urbanen Gebieten mit Hilfe von SAR-Daten ist für verschiedene Anwendungen von Interesse, z.B. zur Lagebeurteilung nach Naturkatastrophen, zur Kartierung von Gebieten mit ständiger Wolkenbedeckung oder zur militärischen Aufklärung. Die SAR-typischen Effekte Layover und Shadowing sind im Stadtbereich stark ausgeprägt. Objekte, die im Schatten großer Gebäude liegen, werden nicht abgebildet und zusätzlich überdeckt Layover Bereiche schwacher Rückstreuung. Eine Möglichkeit der Interpretation urbaner Gebiete mit SAR-Daten ist die Nutzung von InSAR-Daten zwei zueinander orthogonaler Aspekte (THIELE et al., 2007A). Objekte in Schattenbereichen, die bei der Aufnahme aus einem Aspekt verdeckt werden, können in der dazu orthogonalen Aufnahme erfasst werden. Gebäude können anhand von L-Strukturen detektiert werden, die bei der Fusion beider Aspekte entstehen. Die Analyse urbaner Gebiete kann auch mit zwei um eine Basis versetzten SAR-Bildern stereoskopisch geschehen (SIMONETTO et al., 2005). Die stereoskopische Auswertung von mindestens zwei SAR-Bildern der gleichen Szene hat den Vorteil, dass Höhenwerte für Gebäude direkt aus den SAR-Bildern bestimmt werden können (bei InSAR-Daten in urbanen Gebieten oft nicht ohne weiteres möglich). Die stereoskopische Auswertung von zwei SAR-Bildern in Kombination mit einem optischen Luftbild bietet die Möglichkeit, die stereoskopisch ermittelten Höhen in homogenen Bereichen des optischen Bildes

zu glätten, z.B. auf großen Dachflächen von Industriegebäuden (TUPIN & ROUX, 2005). Vielpersprechend und Gegenstand dieses Forschungsprojekts ist die Kombination von einem optischen Fernerkundungsbild und einem SAR-Bild. Nach erfolgreicher, möglichst automatischer Registrierung vom optischen Bild und vom SAR-Bild (WEGNER, 2007) können beispielsweise Grundrisse von Gebäuden extrahiert werden (TUPIN & ROUX, 2003). In dem hier vorgestellten Forschungsprojekt sollen Gebäude darüber hinaus dreidimensional modelliert werden. Erste Ansätze und Ideen liefert dabei die Betrachtung SAR-typischer Effekte bei Brücken (siehe Kapitel 2 und 3). Bei Gebäuden in urbanen Gebieten kommt es noch zu weiteren Effekten, die zur Szenenanalyse genutzt werden können und im Folgenden vorgestellt werden. Werden Gebäude mit Giebeldächern orthogonal zur Längsachse aufgenommen, erscheinen diese im SAR-Bild als zwei parallele Linien, aus deren Abstand sich bei bekannter äußerer Orientierung des Sensors, Gebäudebreite und Dachneigung die Gebäudehöhe ableiten lässt (THIELE et al., 2007b). Dieser Effekt ist gut zu sehen in Abb. 6 rechts. Abgebildet ist ein TerraSAR-X Bild des Stadtteils Linden in Hannover, aufgenommen im High-Resolution Spotlight Modus. In Abb.6 links ist das korrespondierende Luftbild dargestellt.

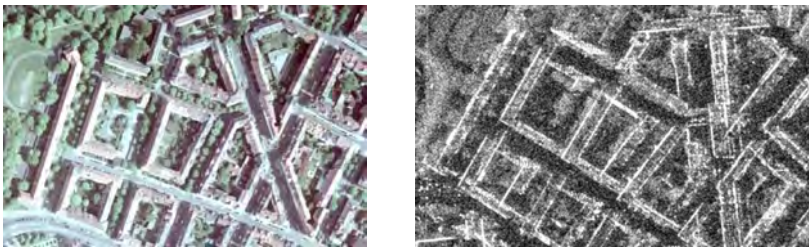


Abb. 6: Links: Optisches Luftbild des Stadtteils Linden in Hannover (© Geoinformation Stadt Hannover), Rechts: TerraSAR-X Bild des gleichen Gebietes wie im optischen Bild (von links beleuchtet)

In Abb. 7 sind die Abbildungseigenschaften für ein Haus mit Flachdach (Abb.7, links) und ein Haus mit Giebeldach (Abb.7, rechts), bei Fortbewegung des Sensors parallel zur Längsachse des Gebäudes, schematisch dargestellt. Für das Gebäude mit Flachdach ist in hellgrau der Layover-Bereich gekennzeichnet, in dem die Gebäudefassade, der vordere Teil des Daches und der Boden abgebildet werden. Zur weißen Linie, dem Bereich mit der höchsten Amplitude, kommt es durch eine Zweifachreflexion des Radarsignals zwischen Gebäudefassade und Boden. Im dunkelgrauen Bereich wird der hintere Teil des Daches abgebildet, der weiter vom Sensor entfernt ist, als das untere Fassadenstück (siehe auch Abb. 8, Mitte). Das Gebäude mit Giebeldach erzeugt eine etwas andere Signatur im SAR-Bild. Zwei parallele Linien mit hoher Amplitude treten auf (siehe auch Abb. 6, rechts und Abb. 9, rechts). Zur ersten (sensornahen) Linie kommt es, da das Giebeldach und das einfallende Radarsignal einen Winkel von annähernd  $90^\circ$  einschließen und deshalb alle Streuer auf dem Dach des Gebäudes die gleiche Entfernung zum Sensor aufweisen. Die dem Sensor zugewandte Seite des Giebeldaches wird so auf einer schmalen Linie abgebildet, da im SAR-Bild der Abbildungsort des Objektes in Entfernungsrichtung von der Distanz zwischen Sensor und Objekt abhängt. Im hellgrauen Bereich wird die Gebäudefassade abgebildet

und Teile der vom Sensor abgewandten Dachseite, falls diese nicht abgeschattet wird. Zur zweiten weißen Linie kommt es, wie schon beim Haus mit Flachdach, aufgrund der Zweifachreflexion des Radarsignals zwischen Fassade und Boden. Der hintere Teil der vom Sensor abgewandten Dachseite wird im dunkelgrauen Bereich abgebildet. In schwarz ist wieder der Schattenbereich dargestellt.

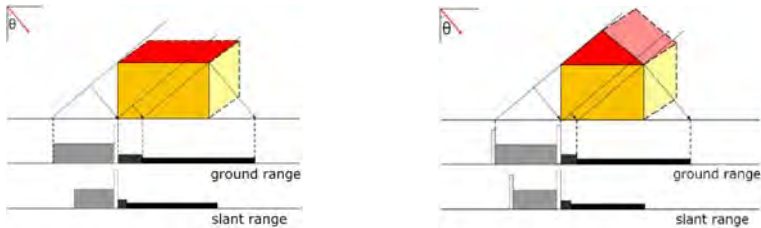


Abb. 7: Links: SAR-Bild eines von links beleuchteten Gebäudes mit Flachdach in Bodengeometrie (ground range) und in Schrägsichtgeometrie (slant range), Rechts: SAR-Bild eines von links beleuchteten Gebäudes mit Giebeldach (nach (THIELE et al., 2007B))

## 5 Gebäudesimulation

Zur genaueren Untersuchung der Gebäudesignatur wurden SAR-Bilder eines Gebäudes mit Flachdach und eines Gebäudes mit Giebeldach simuliert. Zunächst wird der einfache Fall eines Gebäudes mit Flachdach erläutert.

Als Eingangsmodell für den Simulationsprozess wurde eine quadratische Box verwendet (Abb. 8, links), der ein Boden mit hoher spiegelnder und niedriger diffuser Reflexionseigenschaft unterlegt ist. Dem virtuellen SAR-Sensor, Blickrichtung orthogonal zur Ausrichtung des Hauses, wurde für die Bilderzeugung ein Beleuchtungswinkel von  $27^\circ$  vorgegeben. Als Ergebnis findet sich im simulierten Bild (Abb. 8, Mitte) in Entfernungsrichtung zunächst ein Überlagerungsbereich von Dachfläche und Wandfläche, dem ein Intervall diffuser Reflexionsbeiträge der Wand folgt. Zweifachreflexionen zwischen Wand und Boden sammeln sich in einer Linie hoher Intensität, der sich ein ausgeprägter Schattenbereich anschließt.



Abb. 8: Simulation für ein Haus mit Flachdach, Links: Blickrichtung des Sensors orthogonal zur Ausrichtung des Gebäudes, Mitte: Reflexionskarte (von links beleuchtet, Beleuchtungswinkel:  $27^\circ$ ), Rechts: Blickrichtungen des Sensors auf das Gebäudemodell mit Giebeldach



Alle aufgeführten Bereiche mit Ausnahme des Schattens werden zusätzlich von Beiträgen des Bodens überlagert. Streifenartige Effekte innerhalb des Bildes ergeben sich, da die in Entfernungsrichtung ungleichmäßig verteilten Reflexionsbeiträge Entfernungsintervallen gleicher Größe zugeteilt werden müssen, um schlussendlich eine Reflexionskarte in der Azimuth-Range Ebene erzeugen zu können.

Wie unterschiedlich das geometrische Erscheinungsbild eines einzelnen Gebäudes je nach Beobachtungsgeometrie sein kann, zeigt sich anhand des Beispiels eines einfachen Giebeldachmodells (Abb. 9). Die Pfeile in Abb. 8 rechts zeigen die für die Simulation verwendeten Beobachtungsrichtungen des Sensors an. Während sich in Abb. 9 links und Abb. 9 Mitte helle Linien nur durch Zweifachreflexion zwischen Wand- und Bodenfläche ergeben, erkennt man in Abb. 9 rechts eine weitere helle Linie, die durch den Beitrag des Gebäudedachs begründet ist (siehe Kapitel 4). Alle Rückstreubeiträge einer Dachhälfte weisen die gleiche Entfernung zum Sensor auf, wodurch sie in einer Linie zusammenfallen, wohingegen die zweite Dachhälfte vom Sensor aus nicht zu sehen ist. Das Parallelogramm geringer Intensität rechts in Abb. 9 Mitte beruht auf einer Interaktion zwischen der vom Sensor wegweisenden Dachfläche und dem Boden im Hintergrund des Gebäudes.



Abb. 9: Simulation für ein Gebäude mit Giebeldach (ohne Speckle, von links beleuchtet, Beleuchtungswinkel  $45^\circ$ ), Links: Simulation längs der Gebäudeachse (Aspektwinkel A in Abb.8, rechts), Mitte: Simulation diagonal zur Gebäudeachse (Aspektwinkel B in Abb.8, rechts), Rechts: Simulation orthogonal zur Gebäudeachse (Aspektwinkel C in Abb.8, rechts)

## 6 Fazit und Ausblick

Mit Hilfe der gezeigten Effekte, die bei SAR-Bildern von Brücken und Gebäuden auftreten, lassen sich, unter optimalen Bedingungen, sowohl Lage- als auch Höheninformationen gewinnen. In Kombination mit optischen Bildern können zusätzliche Informationen wie z.B. die Dachform (BRUNNER et al., 2008) oder die Gebäudebreite bestimmt werden. Ziel des Projektes ist es, einen iterativen Algorithmus zur Klassifikation urbaner Gebiete zu entwickeln. Dafür werden das optische Bild und das SAR-Bild zunächst einzeln segmentiert. Die resultierenden Segmente werden daraufhin fusioniert und es wird eine Klassifikation der Szene durchgeführt, wobei in den Daten enthaltene Höheninformation mit einbezogen werden soll. So entsteht eine Klassifikation bei gleichzeitiger dreidimensionaler Modellierung der Gebäude. Um qualitativ gute Ergebnisse zu erzeugen, ist ein iterativer Algorithmus vorzuziehen.

## 7 Danksagungen

Wir bedanken uns beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), insbesondere bei Herrn Thomas Hahmann, für die Bereitstellung des TerraSAR-X Bildes in Abb.1. Ebenfalls zu Dank verpflichtet sind wir dem Bereich Geoinformation der Stadt Hannover, hier insbesondere Frau Ulrike Stampa-Wessel und Herrn Rainer Vogt, für die Bereitstellung der Luftbilder von Hannover und die freundliche Betreuung.

## 8 Literaturverzeichnis

- AUER, S.; HINZ, S. & BAMLER, R., 2008: Ray Tracing for Simulating Reflection Phenomena in SAR Images. In: Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2008 (IGARSS2008), Boston, USA., 4 S..
- BRUNNER, D.; LEMOINE, G. & BRUZZONE, L., 2008: Height estimation of man made structures using hybrid VHR optical and SAR imagery. In: Proceedings of the EARSeL Symposium: Remote Sensing-New Challenges of High Resolution, Bochum 2008, CD-ROM, 8 S..
- CADARIO, E.; SCHULZ, K.; GROSS, H.; HAMMER, H.; THIELE, A.; THÖNNESSEN, U.; WEYDAHL, D.J. & SÖRGE, U., 2008: Feature extraction and change detection for bridges over water in airborne and spaceborne SAR image data. In: Proceedings of the EARSeL Symposium: Remote Sensing-New Challenges of High Resolution, Bochum 2008, CD-ROM, 8 S..
- FRANCESCHETTI, G.; GUIDA, R.; IODICE, A.; RICCIO, D.; RUELLO, G. & STILLA, U., 2007: Building Feature Extraction via a Deterministic Approach: Application to Real High Resolution SAR Images. In: Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2007 (IGARSS2007), S. 2681-2684.
- GLASSNER, A.S., 2002: An Introduction to Ray Tracing. San Francisco, Morgan Kaufmann
- INGLADA, J. & GIROS, A., 2004: On the possibility of Automatic Multisensor Image Registration. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, **42**(10), S. 2104-2120.
- ROBALO, J. & LICHTENBERGER, J., 1999: ERS-SAR Images a Bridge. ESA, Earth Observation Quarterly, S. 7-10.
- SIMONETTO, E.; ORIOT, H. & GARELLO, R., 2005: Rectangular Building Extraction From Stereoscopic Airborne Radar Images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, **43**(10), S. 2386-2395.
- SÖRGE, U.; THIELE, A.; CADARIO, E. & THÖNNESSEN, U., 2007: Fusion of High-Resolution InSAR Data and optical Imagery in Scenes with Bridges over water for 3D Visualization and Interpretation. In: Proceedings of Urban Remote Sensing Joint Event 2007 (URBAN2007), 6
- THIELE, A.; CADARIO, E.; SCHULZ, K.; THÖNNESSEN, U. & SÖRGE, U., 2007: Building Recognition from Multi-Aspect High-Resolution InSAR Data in Urban Areas. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, **45**(11), S. 3583-3593.
- THIELE, A.; CADARIO, E.; SCHULZ, K.; THÖNNESSEN, U. & SÖRGE, U., 2007: Feature Extraction of Gable-Roofed Buildings from Multi-Aspect High-Resolution InSAR Data. . In: Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2007 (IGARSS2007), S. 262-265.
- TUPIN, F. & ROUX, M., 2003: Detection of building outlines based on the fusion of SAR and optical features. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Band 58, S. 71-82.

- TUPIN, F. & ROUX, M., 2005: Markov Random Field on Region Adjacency Graph for the Fusion of SAR and Optical Data in Radargrammetric Applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **43**(8), S. 1920-1928.
- WEGNER, J.D., 2007: Automatic Fusion of SAR and Optical Imagery. Diplomarbeit, Fachbereich Geodäsie und Geoinformatik, Leibniz Universität Hannover.
- WEGNER, J.D. & SÖRGE, U., 2008: Bridge height estimation from combined high-resolution optical and SAR imagery. *IntArchPhRS*, Band XXXVII, Teil B7-3, Peking 2008, S. 1071-1076.

## Traffic Information Extraction using TerraSAR-X Data

DIANA WEIHING<sup>1</sup>, STEFAN HINZ<sup>2</sup>, STEFFEN SUCHANDT<sup>3</sup>,  
HARTMUT RUNGE<sup>3</sup> & RICHARD BAMLER<sup>1,3</sup>

*Abstract: The German SAR satellite TerraSAR-X provides images with a resolution down to 1m. It operates in different imaging modes in which the data is acquired with multiple apertures in along-track. This enables the detection of ground moving objects, like moving vehicles. Rising interest in area-wide traffic monitoring motivates spaceborne ground moving target indication which can be an attractive alternative to conventional traffic data acquisition. Specific detection schemes are required to account for the limiting conditions and the special effects moving objects suffer from in the SAR imaging processing. The presented method integrates a-priori knowledge from external sources, e.g. road databases, and exploits additionally multi-temporal data to enhance the detection process. The applicability of this detector and the possibility to extract traffic information from TerraSAR-X data is demonstrated.*

### 1 Introduction

Since the volume of traffic has increased in the last years, traffic monitoring has become a very important task. To get information about a larger road section or even a network, an observation of large areas, preferably at any time, is desirable. Unlike optical sensors, SAR is an active sensor and therefore the acquisition is daylight and weather independent. With the German TerraSAR-X mission, SAR data with high resolution down to 1m is available. Its Dual Receive Antenna (DRA) mode or the Aperture Switching (AS) mode (RUNGE et al., 2006) allow for the reception of two SAR images of the same scene within a small timeframe. In military research the problem of detecting moving objects is known as Ground Moving Target Indication (GMTI) and commonly relies on highly specialized multi-channel systems (ENDER, 1999). Even though TerraSAR-X is suboptimal for GMTI, its along-track interferometric data from the DRA or AS mode can be used for the detection of ground moving objects. Several publications deal with this issue, e.g. (SIKANETA & GIERULL, 2005), (GIERULL, 2002), (SUCHANDT et al., 2008). To compensate this limitation concerning GMTI, a-priori knowledge is integrated into the detection scheme. This a-priori information is based on GIS data of road networks and allows for a prediction of expected signals of possible moving targets in the SAR data.

The revisit period of this satellite mission allows for the periodic collection of data of the same scene using the same acquisition parameters. Therefore, additional information about static objects in the evaluated scene can be considered and is integrated in the processor to enhance the detection process. For instance permanent bright scattering objects which may be detected wrongly can be eliminated by using this kind of further information.

---

<sup>1</sup> Remote Sensing Technology, Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München

<sup>2</sup> Institute for Photogrammetry and Remote Sensing, Universität Karlsruhe, Englerstr. 7, 76131 Karlsruhe

<sup>3</sup> Remote Sensing Technology, German Aerospace Center (DLR), Oberpfaffenhofen, 82234 Wessling

## 2 Moving Objects in SAR Images

In the SAR imaging process, the Earth is scanned in a side-looking fashion during the flight over the scene. The radar antenna transmits microwaves at constant intervals given by the Pulse Repetition Frequency (PRF) in the direction perpendicular to the flight path, the range direction, and records the echoes backscattered on the ground. These echoes are recorded coherently, i.e. the amplitude and the phase of the signal are measured. While the sensor is moving in along-track, or also called azimuth direction, the recorded echoes are assembled into a raw data matrix, where each point scatterer contributes to the matrix as long as it is within the antenna beam footprint. Exploiting each point scatterer's phase history recorded during the observation time, the SAR principle is applied (BAMLER & SCHÄTTLER, 1993). In the following processing step, also called focussing, a matched filter algorithm is applied to form the final SAR image out of the raw data.

However, if an object on the ground is moving, while the echoes are acquired, the phase history of this object differs from that of static objects. In the SAR focussing algorithm, this change is not modelled and therefore causes the vehicle not being imaged "correctly". The resulting artefacts depend on the motion direction of the moving object:

A constant motion of the vehicle in across-track direction with respect to the sensor motion causes an additional linear phase trend in the recorded signal. This linear phase component of the spectrum corresponds to a shift in time domain. Hence, vehicles moving in across-track get displaced in the image in azimuth direction depending on their line-of-sight velocity  $v_{los}$ . This shift can be expressed in meters (see e.g. (HINZ et al., 2007) for a mathematical derivation):

$$\Delta_{azimuth} \approx -R_0 \frac{v_{los}}{v_{sat}}$$

where  $R_0$  is the shortest distance between point scatterer and the radar, and  $v_{sat}$  is the satellite's velocity.

A phase difference of the moving object will be present in the two images of the different apertures. This interferometric phase is dependent on the along-track baseline  $B_{ATI}$ , i.e. the distance between the two phase centers in flight direction:

$$\phi = \left( \frac{4\pi B_{ATI} v_{los}}{\lambda v_{sat}} \right)$$

with  $\lambda$  being the wavelength.

If the vehicle is moving in along-track, the relative velocity between sensor and moving object differs from stationary objects. The curvature of the phase history gets changed. Focussing with the matched filter where stationary objects are assumed, leads to a spread of the signal in the image. Such a blurring of the signal may also be caused by accelerations. For a detailed presentation of the effects caused by the point scatterer's motion and acceleration see (SHARMA et al., 2006), (MEYER et al., 2006).

Knowing the positions and directions of roads from GIS data, it is possible to derive a-priori knowledge for the acquired scene. Depending on the distance of a pixel to an associated road segment, which corresponds to the shift  $\Delta_{az}$ , the expected phase  $\phi$  can be predicted for each pixel. In Fig.1 one can see the a-priori phase  $\phi$  for a section of the TerraSAR-X data take DT10001 which is evaluated further in this paper (see also Fig. 4).

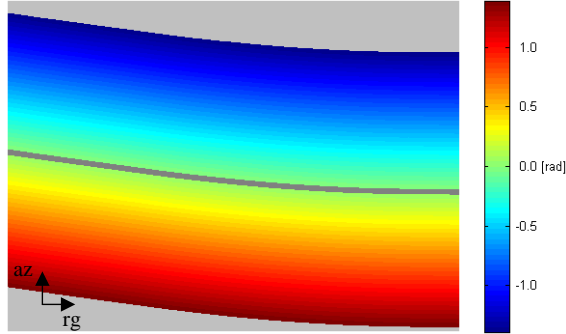


Fig. 1: Expected phase  $\Phi$  derived from GIS data

Only the parts up to a maximum displacement, here corresponding to 250 km/h, are predicted. The light grey parts are excluded from evaluation.

### 3 Detection of Moving Vehicles

#### 3.1 Detection Scheme

Since the signal of a moving vehicle will be displaced or blurred in the image, the signal will superpose with the background signal, often called clutter. This hampers the detection of ground moving objects.

To decide whether a moving vehicle is existent or not, an expected signal hidden in clutter is compared with the actual measurement in the SAR data. Two hypotheses  $H_0$  and  $H_1$  shall be distinguished:

$H_0$ : only clutter and noise are present

$H_1$ : additionally to clutter and noise a vehicle's signal is present

The mathematical framework is derived from statistical detection theory. The optimal test is the likelihood-ratio-test:

$$\Lambda = \frac{f(\vec{x} | H_1)}{f(\vec{x} | H_0)}$$

where

$$f(\vec{x} | H_0) = \frac{1}{\pi^2 |C|} \exp \left\{ -\vec{x}^H C^{-1} \vec{x} \right\}$$

and

$$f(\vec{x} | H_1) = \frac{1}{\pi^2 |C|} \exp \left\{ -(\vec{x} - \vec{S})^H C^{-1} (\vec{x} - \vec{S}) \right\}$$

are the probability density functions.  $\vec{S}$  represents the expected signal,  $\vec{x}$  stands for the measured signal, and  $C$  is the covariance matrix, see e.g. (BAMLER & HARTL, 1998).

From the equations above the decision rule of the log-likelihood test based on threshold  $\alpha$  can be derived:

$$|\vec{S}^H C^{-1} \vec{x}| > \alpha$$

The measured signal  $\vec{x}$  consists of the SAR images from the two apertures:

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix}$$

where the indices stand for the respective channel. With the a-priori phase  $\phi$  derived for every pixel, see e.g. Fig. 1, the expected signal  $\vec{S}$  can be derived:

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \exp \left\{ j \frac{\phi}{2} \right\} \\ \exp \left\{ -j \frac{\phi}{2} \right\} \end{pmatrix}$$

The covariance matrix is defined as in (BAMLER & HARTL, 1998):

$$C = E\{XX^H\} = \begin{pmatrix} \bar{I}_1 & \gamma \bar{I} \\ \gamma^* \bar{I} & \bar{I}_2 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 1 & \gamma \\ \gamma & 1 \end{pmatrix}$$

with

$$\bar{I} = \sqrt{\bar{I}_1 \bar{I}_2} = \sqrt{E[|u_1|^2] E[|u_2|^2]} \quad .$$

The locally varying threshold  $\alpha$  to decide if the evaluated pixel is a vehicle or not depends on a given false alarm rate, which gives the cut-off value for the cumulative function of the log-likelihood test.

### 3.2 Integration of multi-temporal data

As a-priori knowledge not only an expected phase is integrated, but some other information about the scene can be exploited. Due to the revisit period of TerraSAR-X, it is possible to collect multi-temporal data about the evaluated scene to enhance the detection process.

For one test site (near Dresden, Germany) data takes with the same acquisition parameters are collected to set up a stack of images. By pixel-wise averaging over time, noise can be reduced and permanent and stable scatterers can be identified. Scatterers that show a high and time-consistent signal-to-clutter-ratio (SCR) are so called Persistent Scatterers (PS) (ADAM et al., 2004). Those bright PS candidates which may be detected wrongly can be eliminated by using this kind of further information.

## 4 Results

A modular traffic processor has been developed in prior work of (SUCHANDT et al., 2006) at the DLR, in which different moving vehicle detection approaches are integrated. The proposed likelihood ratio detector has been included additionally into this environment.

The test site near Dresden, Germany, has been used for analyses. The AS data take DT10001 was processed with the traffic processor, whereas from the available detection approaches only the likelihood ratio detector was used to detect the vehicles in the SAR data.

From the multi-temporal images of this scene a mean image was calculated to receive an SCR-map and hence to determine PS candidates. Candidates were chosen with an SCR greater than 2.0. During the acquisition of DT10001 by TerraSAR-X a flight campaign over the same scene was conducted. Optical images were acquired with the DLR's 3K optical system mounted on the airplane. Detection and tracking of the vehicles in the optical images deliver reference data to ensure the detections results of the likelihood ratio detector in SAR data. The reference vehicles were additionally classified into two classes, to gain more informative values for the evaluation of the detection results. It was distinguished between trucks and passenger cars.

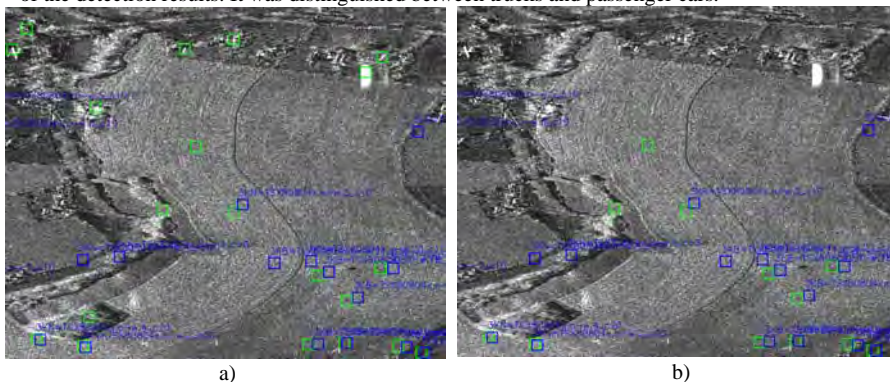


Fig. 2: Detections (green) and reference data (blue) at the displaced positions of the vehicles overlaid on the temporal mean image a) all initial detections b) after PS elimination

Fig. 2 shows a part of the evaluated scene of DT10001. The temporal mean image is overlaid with the initial detections plotted in green. The blue rectangles mark the displaced positions of the reference data which have been estimated by calculating the displacement according to their



measured velocities. Due to measuring inaccuracy these positions may differ a bit from those of the detections in the SAR images.

Having analyzed the SCR over time to identify PS candidates, some false detections have been eliminated (see Fig. 2).

One example for such a persistent scatterer which was detected wrongly is shown in Fig. 3. On the left hand side the position of the detection is marked in the mean SAR image and on the left hand side one can see the same area in an optical image. The false detection is obviously a wind wheel.

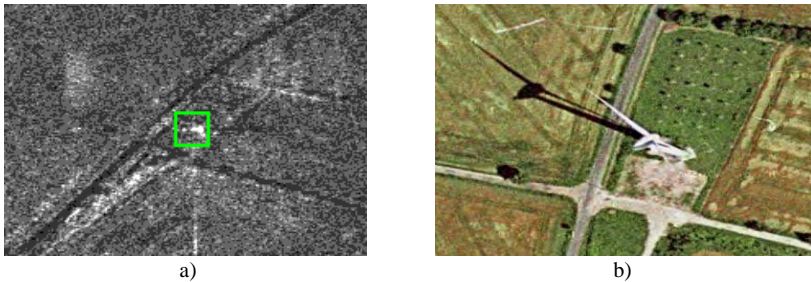


Fig. 3: a) Detection in the SAR image b) optical image of the same area

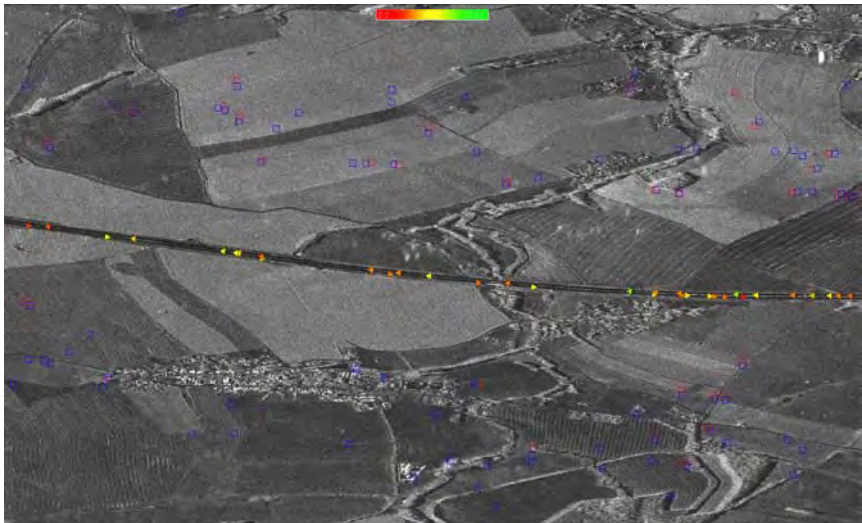


Fig. 4: Final detection results (red) and reference data (blue) at the displaced positions of the vehicles overlaid on the mean SAR image.

Even though only a percentage of all reference vehicles have been detected, it is possible to derive reliable traffic parameters due to the high correctness. Traffic flow parameters like the mean velocity, drive-through times etc. can be extracted for the evaluated road section. This information may also be used to enhance traffic models to predict traffic or verify certain parameters of the models which are used e.g. for traffic simulations.

## 5 Conclusions

In this article an approach for moving vehicle detection in spaceborne SAR data has been presented and its applicability using TerraSAR-X AS data has been demonstrated. The evaluation shows the potential to deliver reliable information from space about the traffic situation on roads. The achieved results showed a good correspondence with the reference data. Integrating multi-temporal data helps to eliminate bright in time scattering objects, which may be detected wrongly. It should be noted however, that the approach is limited to open and rural scenes, where the assumption of homogeneous background clutter is approximately fulfilled.

## 6 References

- ADAM, N.; KAMPES, B. & EINEDER M., 2004: Development of a Scientific Permanent Scatterer System: Modifications for Mixed ERS/ENVISAT Time Series. Proceedings of ENVISAT Symposium, Salzburg, Austria.
- BAMLER, R. & HARTL P., 1998: Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems* 14 (4), pp. R1-R54.
- BAMLER, R. & SCHÄTTLER, B., 1993: SAR Data Acquisition and Image Formation. *Geocoding: ERS-1 SAR Data and Systems*, Wichmann-Verlag. pp. 53-102.
- ENDER, J., 1999: Space-time processing for multichannel synthetic aperture radar. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 11(1), pp. 29-38.
- GIERULL, C., 2002: Moving Target Detection with Along-Track SAR Interferometry. Technical Report DRDC-OTTAWA-TR-2002-084, Defence Research & Development Canada.
- HINZ, S.; MEYER, F.; EINEDER, M. & BAMLER, R., 2007: Traffic Monitoring with Spaceborne SAR – Theory, Simulations, and Experiments. *Computer Vision and Image Understanding* 106. pp. 231-244.
- MEYER, F.; HINZ, S.; LAIKA, A.; WEIHING, D. & BAMLER, R., 2006: Performance Analysis of the TerraSAR-X Traffic Monitoring Concept. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61 (3-4), pp. 225-242.
- RUNGE, H.; LAUX, C.; GABELE, M.; METZIG, R. & STEINBRECHER, U., 2006: Performance Analysis of Virtual Multi-Channel Modes for TerraSAR-X. *Proceedings of EUSAR European Conference on Synthetic Aperture Radar*.
- SHARMA, J.; GIERULL, C. & COLLINS, M., 2006: The influence of target acceleration on velocity estimation in dual-channel SAR-GMTI. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(1), pp. 134-147.

- SIKANETA, I. & GIERULL, C., 2005: Two-Channel SAR Ground Moving Target Indication for Traffic Monitoring in Urban Terrain. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 61 (3-4), pp. 95-101.
- SUCHANDT, S.; EINEDER, M.; MÜLLER, R.; LAIKA, A.; HINZ, S.; MEYER, F. & PALUBINSKAS, G., 2006: Development of a GMTI processing system for the extraction of traffic information from TerraSAR-X data. *Proceedings of EUSAR European Conference on Synthetic Aperture radar*.
- SUCHANDT, S.; RUNGE, H.; BREIT, H.; KOTENKOV, A.; WEIHING, D. & HINZ, S., 2008: Traffic Measurement with TerraSAR-X: Processing System Overview and First Results. *Proceedings of EUSAR European Conference on Synthetic Aperture radar*.

# Genauigkeitsanalyse der 3D-Trajektorie von Mini-UAVs

HENRI EISENBEISS<sup>1</sup>, WERNER STEMPFHUBER<sup>1</sup> & MICHAEL KOLB<sup>2</sup>

*Zusammenfassung: Nach einer Einführung über UAVs und einer Beschreibung von verschiedenen UAV-Systemen wird im vorliegenden Artikel eine Methode für die unabhängige Evaluation der Bahndaten von UAVs vorgestellt. Die vorliegenden Untersuchungen haben gezeigt, dass kommerziell verfügbare Mini-UAVs bereits heute in der Photogrammetrie für „Near-Realtime“ Anwendungen einsetzbar sind. Die Genauigkeiten der Positionierung von Low-cost Sensoren liegen bei 1-2 m, wobei die relativ Genauigkeit im Dezimeterbereich liegt.*

## 1 Einleitung

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) umfassen alle unbemannten und mehrfach verwendbaren motorisierten Luftfahrzeuge (VAN BLYENBURG, 1999) und fliegen normalerweise manuell-ferngesteuert, semi-automatisch, automatisch oder verknüpfen eine Kombination dieser Möglichkeiten. UAVs werden anhand von Größe/Gewicht, Reichweite, Flughöhe und Flugdauer in „Micro, Mini, Close, Short, Medium and Long Range“ sowie „Low, Medium and High-altitude“ klassifiziert (VAN BLYENBURG, 1999). Die Reichweite in diesem Kontext entspricht der Verfügbarkeit der Funkverbindung für die Steuerung des Flugkörpers und dem Up- und Downlink für Telemetrie- und Bilddaten.

Um Mini-UAVs (EISENBEISS, 2004) in der Photogrammetrie als Plattform für verschiedene Sensoren erfolgreich einzusetzen, muss das Flugverhalten bzw. die Genauigkeit der Flugbahn von UAVs untersucht und analysiert werden. Viele aktuelle Projekte beschäftigen sich ausschließlich mit Simulationen, obwohl zum heutigen Zeitpunkt bereits einsetzbare Systeme (High-end, Low-cost und Open Source) existieren, die nur für die Bedürfnisse der Photogrammetrie bzw. der Vermessung angepasst werden müssten. Unbemannte Flugobjekte sind zum Beispiel besonders gut geeignet für Anwendungen im Naturgefahrenbereich und unzugänglichen Gebieten (ohne bzw. minimierte Verwendung von Passpunktinformationen). Für diese Aufgaben ist eine schnelle Verfügbarkeit von Informationen (Übersichtsbilder, Karten und Höhenmodelle) erforderlich. Um diese Daten korrekt auswerten zu können, müssen die Genauigkeiten der erfassten Daten sowie das Flugverhalten der Systeme bekannt sein. Da es sich bei den meisten Mini-UAVs um Low-cost Systeme handelt, liegen die Genauigkeitswerte für die 3D-Position und Orientierung bzw. Längs- und Querneigung des Systems häufig nicht vor.

Der erste Teil dieses Beitrags wird einen Überblick über verschiedene aktuelle Mini-UAV-Systeme geben. Danach werden zwei Verfahren vorgestellt, welche eine Aussage über die

1) Henri Eisenbeiss, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP), ETH Zürich, Wolfgang-Pauli-Strasse 15, HIL D52.4, CH-8093 Zürich; Email: [henri.eisenbeiss@geod.baug.ethz.ch](mailto:henri.eisenbeiss@geod.baug.ethz.ch);  
Werner Stempfhuber, IGP, HIL D43.1, Email: [werner.stempfhuber@geod.baug.ethz.ch](mailto:werner.stempfhuber@geod.baug.ethz.ch)

2) Michael Kolb, Basler & Hofmann, Ingenieure und Planer AG, Bachweg 1, CH-8133 Esslingen; Email: [michael.kolb@bhz.ch](mailto:michael.kolb@bhz.ch)

Genauigkeit der berechneten Positionen des UAVs aus den Telemetriedaten ermöglichen. Im Anschluss wird die Messkampagne erläutert und das Referenzsystem zur Verifizierung der 3D-Flugspur mit den erzielten Ergebnissen dargestellt.

## 2 UAV-Systeme

Der Begriff UAV wird in Fachrichtungen wie der Robotik, künstlichen Intelligenz, Informatik, dem Maschinenbau sowie der Photogrammetrie und Fernerkundung verwendet. Zusätzlich tauchen in der Literatur weitere Terminologien wie Remotely Piloted Vehicle (RPV), Remotely Operated Aircraft (ROA), Unmanned Aircraft Systems (UAS) und Unmanned Vehicle Systems (UVS) auf. Viele dieser Begriffe sind mehrheitlich vom Militär entwickelt und geprägt worden. Unter dem Begriff UAV können Starrflügler, Rotorflügler, Ballons und motorgesteuerte Kites zusammengefasst werden (VAN BLYENBURG, 1999).

Rotorflügler untergliedert man in Ein-, Doppel-, Vier-, Acht- und Multirotorsysteme. Sie können im Gegensatz zu Flugzeugen näher am Objekt operieren und verfügen über eine höhere Flexibilität in der Steuerung von Flugmanövern (BENDEA et al., 2007). Im Gegensatz dazu sind Starrflügler sehr gut geeignet, lange in der Luft zu bleiben, große Flächen während eines Fluges abzudecken und generell in höheren Luftschichten eingesetzt zu werden.

Doppelrotorsysteme (Koaxialsysteme) können im Vergleich zu Einrotorsystemen (klassischer Helikopter) einfacher gesteuert werden und haben eine höhere Leistungskapazität (~30 %). Quadrokopter (Vierrotorsysteme, vgl. Abb. 2 2) werden bislang mehrheitlich für die fotografische Dokumentation von kleineren Gebieten und Objekten eingesetzt und sind aufgrund ihrer Größe und ihres Gewichts anfälliger gegenüber Umwelteinflüssen (z.B. Wind). Multikopter bieten im Vergleich zu Quadrokoptern eine höhere Nutzlast und Absturzsicherheit.

Tabelle 1: Übersicht über evaluierte UAV-Systeme.

	Quadrokopter		Helikopter			Starrflügler
Eigenschaft	MD4-2000	Mikrokopter	Copter 1B	Scout B1-100	KOAX X-240	Carolo T200
UAV Kategorie	Mikro-UAV	Mikro-UAV	Mini-UAV	Mini-UAV	Mini-UAV	Mini-UAV
Besonderheit	Karbon-chassis	Open Source	Im Einsatz seit 2003	Laserscanner	Einsatz im Hochgebirge	Flächenflieger
Länge	1 m	0.3-0.5 m	2 m	3.3 m	1.8 m	1.8 m
Motortyp	"Gearless brushless" Elektromotor	"Gearless brushless" Elektromotor	Benzin, 26 ccm	Benzin, 100 ccm	8kw Turbine	Zweimotoriges Flugzeug (Elektromotor)
Anzahl von Hauptrotoren	4	4 / 8	1	1	6	2 Propeller
Rotorlänge Ø / Spannweite	0.37 m	0.25 / 0.3 m	1.80 m	3.2 m	2.40 m	2.0 m
Gewicht max.	900 g	500-1200 g	15 kg	75 kg	30 kg	5.6 kg
Zuladung	200 g	200-500 g	5 kg	18 kg	8 kg	1 kg
Einsatzdauer	20 min	5-20 min	30 min	60 min	40 min	45 min

Ballons und Kites können kostengünstigere Alternativen zu Modellhelikoptern darstellen, sind allerdings noch mehr von Witterungsverhältnissen und den lokalen Gegebenheiten abhängig.

Im zivilen Bereich müssen UAVs aus Sicherheits- und Versicherungsgründen mit Backup-Piloten geflogen werden. In der Regel übernimmt der Operateur bzw. das System zur autonomen Steuerung bisher nur teilweise die Kontrolle. Wesentliche Vorteile von UAVs sind ihre hohe Flexibilität, schnelle und damit effiziente Erfassung kleinerer bis mittlerer Aufnahmegebiete sowie ein genaues Abfliegen der geplanten Flugrouten mittels des integrierten GPS/INS-Navigationssystems. Eine Auswahl von (semi-) autonomen Systemen kann Tabelle 1 entnommen werden. Die Entwicklungen und Forschungsschwerpunkte aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz, Anwendungen im Militär sowie die Fortschritte in den letzten Jahren im zivilen Bereich haben die Weiterentwicklung der UAVs primär beeinflusst. Einen ersten Überblick über die Vielfalt von Forschungsbereichen, Firmen und Fachverbänden zum Thema UAVs gibt Tabelle 2. Die Verwendung von UAVs in der Photogrammetrie ist korreliert mit der Entwicklung von Low-cost Sensoren wie GPS, INS und Digitalkameras. Low-cost Sensoren bedeuten in diesem Kontext nicht nur geringe Kosten, sondern auch deren Miniaturisierung und Verringerung des Gewichts.

Tabelle 2: Auswahl von Mini-UAV-Herstellern, Communities und Forschungseinrichtungen.

Name	Typ	Webseite
Aeroscout	Firma	<a href="http://www.aeroscout.ch/">http://www.aeroscout.ch/</a>
Airrobot	Firma	<a href="http://www.airrobot.de/">http://www.airrobot.de/</a>
Ascending Technologies	Firma	<a href="http://www.asctec.de">http://www.asctec.de</a>
Geocopter	Firma	<a href="http://geocopter.nl/">http://geocopter.nl/</a>
microdrones GmbH	Firma	<a href="http://www.microdrones.com">http://www.microdrones.com</a>
SwissUAV	Firma	<a href="http://www.swiss-uav.com/swiss-uav/index.php">http://www.swiss-uav.com/swiss-uav/index.php</a>
weControl	Firma	<a href="http://www.wecontrol.ch">http://www.wecontrol.ch</a>
UAV forum	Forum	<a href="http://www.uavforum.com/">http://www.uavforum.com/</a>
Mikrokopter	Open source	<a href="http://www.mikrokopter.de">http://www.mikrokopter.de</a>
Paparazzi	Open source	<a href="http://paparazzi.enac.fr">http://paparazzi.enac.fr</a>
DLR	Forschungsanstalt	<a href="http://www.dlr.de/ft/en/desktopdefault.aspx/tabid-1377/1905_read-3350/">http://www.dlr.de/ft/en/desktopdefault.aspx/tabid-1377/1905_read-3350/</a>
AUVSI	Society	<a href="http://www.auvsi.org/">http://www.auvsi.org/</a>
UVS international	Society	<a href="http://www.uvs-international.org/">http://www.uvs-international.org/</a>
Stanford University	Universität	<a href="http://sun-valley.stanford.edu/arl.html">http://sun-valley.stanford.edu/arl.html</a>
Georgia Tech Mobile Robot Lab	Universität	<a href="http://www.cc.gatech.edu/ai/robot-lab/research.html">http://www.cc.gatech.edu/ai/robot-lab/research.html</a>
TU-Berlin	Universität	<a href="http://pdv.cs.tu-berlin.de/lfa/index.htm">http://pdv.cs.tu-berlin.de/lfa/index.htm</a>
UAV ETHZ	Universität	<a href="http://www.uav.ethz.ch/">http://www.uav.ethz.ch/</a>
UAV Photogrammetry	Universität	<a href="http://www.photogrammetry.ethz.ch/research/heli/index.html">http://www.photogrammetry.ethz.ch/research/heli/index.html</a>
USC, Southern California	Universität	<a href="http://www-robotics.usc.edu/~avatar/">http://www-robotics.usc.edu/~avatar/</a>
Virtual Monitoring (ViMo),	Universität	<a href="http://www.fhnw.ch/habg/ivgi/forschung/vimo">http://www.fhnw.ch/habg/ivgi/forschung/vimo</a>
Waterloo Aerial Robotics Group	Universität	<a href="http://www.ece.uwaterloo.ca/~warg/index.html">http://www.ece.uwaterloo.ca/~warg/index.html</a>
WITAS	Universität	<a href="http://www.ida.liu.se/ext/witas/">http://www.ida.liu.se/ext/witas/</a>

Im Folgenden werden zwei Mini-UAV-Systeme vorgestellt, welche die Bereiche Modellhelikopter und Quadrokopter sowie kommerzielle und Open Source Lösung repräsentieren.

## 2.1 Copter 1B

Das Mini-UAV Copter 1B (siehe Tabelle 1 1 und Abb. 1 1) ist ein autonom fliegender benzinbetriebener Modellhelikopter (Surveycopter, 2009), welcher mit dem GPS/INS Navigationssystem wePilot1000 der Firma weControl ausgestattet ist (weControl, 2009). Die dazugehörige Bodenstation (weGCS – weControl Ground Control Station) steuert den Modellhelikopter im „assisted-“ und im autonomen Flugmodus (EISENBEISS, 2004).

Das Navigationssystem besteht aus den folgenden Komponenten: Höhenstabilisierung, Kontrolleinheit der Geschwindigkeiten, 3D-Positionssensoren und Orientierungswinkel der Plattform basierend auf einem integrierten GPS/INS-System (Novatel's OEMV1 GPS-Empfänger, 10g Beschleunigungsmesser (Colibrys), 100°/s Kreisel (Silicon Sensing), Höhenmesser und Kompass (Honeywell HMR2300). Zusätzlich erlaubt das System mittels integrierten Computers die Zuladung, in unserem Fall eine Kamera, zu steuern und die Telemetriedaten aufzuzeichnen. Für das System weControl wird eine absolute Genauigkeit für die Position von 1.8/2 m (Lage/Höhe) und für die Winkelmessung von 0.1/1 ° (Roll- und Nick-/Gierwinkel) angegeben (EISENBEISS, 2009).

Die Bodenstation gestattet neben der Steuerung des Systems auch eine Überwachung der wichtigsten Flugdaten (Benzinanzeige, Motortemperatur, Funkverbindung und Kontrolle der angebenen und ausgeführten Flugkommandos) des UAVs sowie eine visuelle Überprüfung der Position und Bildabdeckung via Videolink. Außerdem besteht die Möglichkeit, mit Hilfe einer Flugsimulation die definierte Flugbahn und Parameter vorab zu überprüfen.



Abb. 1: Modellhelikopter Copter 1B mit Kamera und 360° Prisma.

## 2.2 Open Source Projekt „Mikrokopter“

Das Open Source Projekt Mikrokopter wurde Ende 2006 von zwei Elektroingenieuren aus Ostfriesland ins Leben gerufen (Mikrokopter, 2009). Im Vergleich zu den meisten kommerziellen Systemen fallen die Anschaffungskosten mit ca. 1000 EUR deutlich geringer aus, jedoch darf die

Untersagung einer kommerziellen Nutzung sowie der erhebliche Arbeitsaufwand beim Eigenbau nicht vernachlässigt werden.

Die zum Bau eines Mikrokopters (Abb. 2 2) erforderlichen Komponenten bestehen in der Basisausführung aus vier Brushless Elektromotoren inklusive Motorregler, zwei gegenläufigen Propellerpaaren, LiPo-Akku und Funkempfänger, Rahmen sowie dem Mikrocontroller für die Flugregelung.



Abb. 2: Fotoflug mit einem Mikrokopter an der ETH.

Auf der sogenannten Flight-Ctrl Hauptplatine befinden sich sämtliche Sensoren, die zum Fliegen benötigt werden. Die vier Wesentlichsten davon sind

- ein Hauptprozessor AVR Atmel ATMEGA644@20MHz,
- drei Kreisel ENBC-03R ( $\pm 300^\circ/\text{sec}$ ,  $-5$  bis  $75^\circ\text{C}$ ),
- drei Beschleunigungssensoren (ACC) LIS3L02AS4)
- und ein optionaler Luftdrucksensor MPX4115 (15-115 kPa,  $-40$  bis  $+125^\circ\text{C}$ , maximaler Fehler von 1,5%).

Weitere optionale Komponenten beim Mikrokopter sind

- der Navi-Ctrl Bausatz mit ARM9-Mikrocontroller,
- ein 3-Achsen-Magnetfeldsensor (MK3Mag) für die Minimierung des Drifts in Gierrichtung
- sowie ein GPS-Modul (MK-GPS) LEA-4H der Firma u-blox (2D-Lagegenauigkeit von 2 m für 50 % der Positionslösungen).

Einige Mitglieder des Mikrokopter-Forums haben damit bereits erfolgreich semi-automatische Funktionen wie Coming Home, Position Hold, Way Point Navigation und Follow Me umgesetzt. Die Way Point Navigation ist besonders gut geeignet für photogrammetrische Anwendungen, weil diese Funktion die Definition der Bildaufnahmepunkte, wie bei der klassischen Flugplanung, im Vorfeld erlaubt.



### 3 Überprüfung der Positionierungsgenauigkeit von Mini-UAVs

#### 3.1 Untersuchung der Genauigkeit der Positionierung

Um eine unabhängige Aussage über die Positionierungsgenauigkeit von Mini-UAVs treffen zu können, müssen folgende Komponenten untersucht werden: Montage, Synchronisation und Kalibrierung der Sensoren GPS, INS, Barometer, Kompass und Kamera (Abb. 3 Abb. 3 A) sowie die anfängliche Orientierung der inertialen Messeinheit (SKALLOUD, 1999).

Die optimale Platzierung der Sensoren ist keine triviale Aufgabe. Daher sollten die Effekte, die durch Kalibrierungsfehler des Offsets und der Verdrehungen der verschiedenen Sensorachsen entstehen, minimiert und Bewegungen zwischen den Sensoren vermieden werden. Zusätzlich sind Vibrationseinflüsse der Plattform auf die Sensorik mittels Dämpfung zu verringern. Zum Beispiel können Vibrationen eine Bildunschärfe zur Folge haben. Die absolute Genauigkeit der Positionierung kann besonders durch eine unzureichende zeitliche Synchronisation der Sensoren verschlechtert werden. Da die absolute Genauigkeit von Low-cost GPS-Sensoren im Meterbereich liegt, kann der Offset zwischen Kamera und GPS-Sensor (kleiner als 0,5 m) bei den meisten Mikro- und Mini-UAVs vernachlässigt werden. Bei Verwendung von DGPS oder größeren Plattformen, wie der Scout B1-100 (vgl. Tabelle 1), sollte der Offset allerdings erfasst werden. Die Verdrehung der Koordinatenachsen zwischen GPS und INS wird in zwei Stufen (grob oder fein) berechnet. Unter der Annahme, dass nur die Erddrehung und der Einfluss der Gravitation beobachtet wurden, kann man eine grobe Ausrichtung näherungsweise aus den Rohdaten ableiten. Die genäherten Werte können danach in einer Kalmanfilterung mit „misalignment states“ und einer Nullgeschwindigkeit für Strapdown INS-Systeme ermittelt werden. Für ein integriertes System kann eine genauere Abschätzung durch die GPS-Position und die Geschwindigkeit erfolgen (SKALLOUD, 1999). Weiterhin kann der Vektor zwischen GPS/INS und Kamera sowie die Rotation der Koordinatenachsen durch eine Testfeldkalibrierung erfolgen (CRAMER, 2001). Das UAV fliegt dafür über ein ausgelegtes Passpunktfeld, wobei die Orientierung aus GPS/INS Startwerte für die Ausgleichung bietet. Aus der Bündelausgleichung können somit die Verbesserungen der Orientierungselemente abgeleitet und die Offsets hergeleitet und berücksichtigt werden.

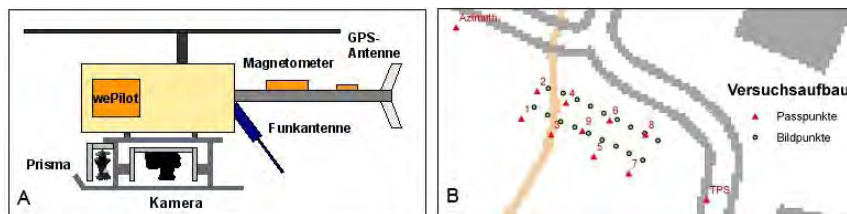


Abb. 3: (A) Schema der Sensoren am Copter 1B, (B) Versuchsaufbau mit Tachymeter, Passpunkten und den geplanten Bildpunkten.

Im Weiteren stellen wir eine Methode vor, die es erlaubt, eine Aussage über die absolute Genauigkeit der Positionierung des untersuchten UAVs Copter 1B zu treffen.

### 3.2 Kinematische Tachymetermessung

Die präzise Beschreibung einer 3D-Trajektorie von UAVs in Echtzeit kann durch verschiedene geodätische Verfahren bestimmt werden. Für Anwendungen im Bereich von wenigen Millimetern für die absolute Lage- und Höhengenaugkeit und einer Reichweite von  $\pm 200\text{--}300\text{ m}$  eignet sich hier der Einsatz von zielverfolgenden Tachymetern. Dieses Polarmesssystem bestimmt aus der Schrägdistanz, sowie dem Horizontal- und Vertikalwinkel auf einen bewegten  $360^\circ$ -Reflektor die XYZ-Koordinate bzgl. einer definierten Zeiteinheit. In den letzten Jahren wurden von allen namhaften geodätischen Instrumentenherstellern solche Totalstationen entwickelt und für die Anforderungen kinematischer Beobachtungen optimiert. GNSS, Lasertracker, Inertialmesssysteme, Interferometer oder Laserscanner sind für solche Anforderungen nicht geeignet. Neben verschiedenen Spezialanwendungen wird das terrestrische Messverfahren des zielverfolgenden Tachymeters hauptsächlich für die Steuerung von Baumaschinen oder das Messen im 1-Mann-Modus verwendet.

Unter Berücksichtigung verschiedener Einflussparameter wie

- der Verfolgungsgeschwindigkeit,
- der inneren Genauigkeit des  $360^\circ$ -Prismas,
- des dynamischen Verhaltens des integrierten Zweiachsneigungssensors,
- der Synchronisation zwischen der Winkel- und Streckenmessung unter Beachtung der Latenz- bzw. der Totzeiten,
- der Einflussgrößen des Zielverfolgungssystems oder
- des Datenfunks und der Datenübertragung

können hier 3D-Anwendungen mit einer absoluten Genauigkeit von wenigen Millimetern erreicht werden. Untersuchungen an einem Instrument der Serie Leica TPS1200+ der Firma Leica Geosystems in einem geodätischen Labor der ETH Zürich haben die Leistungsfähigkeit solcher zielverfolgender Tachymeter bestätigt (STEMPFHUBER, 2008).

## 4 Versuchsaufbau und Datenaufnahme

### 4.1 Versuchsaufbau

Die Messungen zur Untersuchung der 3D-Positionsgenauigkeit des UAVs wurden auf dem Campus-Gelände der ETH Zürich - Höggerberg durchgeführt (vgl. Abb. 3 B). Zunächst wurde entlang des Testgebiets ein temporäres Passpunktfeld im Schweizer Landeskoordinatensystem LV03 definiert. Damit konnten die Messungen des Tachymeters sofort im entsprechenden 3D-Zielsystem ausgegeben werden. Die über das jeweilige GPS-Modul gelieferten UTC-Zeitmarken dienten als gemeinsame Auswertungsreferenz.

Die Flughöhe des Modellhelikopters Copter 1B während der Aufnahme wurde auf  $25/30\text{ m}$  über dem Boden respektiv für Streifen 1/2 festgelegt. Für die Bildaufnahmen wurde eine Still-Videokamera Nikon D2Xs mit einem  $18\text{ mm}$  Objektiv verwendet. Die im Vorfeld berechneten Flugparameter wurden in die Flugsteuerungssoftware weGCS eingegeben.

Start und Landung des Helikopters wurden aus Sicherheitsgründen manuell durchgeführt. Nach dem der Helikopter eine Flughöhe von  $10\text{ m}$  erreichte und alle Systemchecks positiv ausfielen, wurde der Flugmodus auf autonom gewechselt und der erste Wegpunkt angeflogen. Diese Position wurde als Stoppunkt definiert, sodass der Tachymeter auf das am Helikopter montierte Prisma ausgerichtet werden konnte. Nach erfolgreicher Initialisierung der Tachymetermessung

wurden zwei Streifen (vgl. Abb. 5 Abb. 5) abgeflogen, die in gleicher Richtung angeordnet wurden. Der Helikopter musste bei einem Streifenwechsel dadurch einen zusätzlichen Übergangsstreifen fliegen. Mit Erreichen der letzten Position des zweiten Flugstreifens konnte der Helikopter in den manuellen Modus geschaltet und gelandet werden. Dieses Vorgehen wurde dreimal wiederholt, wobei die Länge der zu fliegenden Spur im zweiten und dritten Flug verlängert, wodurch eine maximale Distanz zum Tachymeter von ca. 110 m erreicht wurde.

## 4.2 Datenaufnahme

Die Aufnahme der Bilder kann in verschiedenen Modi durchgeführt werden. Der wePilot 1000 erlaubt ein manuelles Auslösen der Kamera an einem Stoppunkt oder im kontinuierlichen Flugmodus. Im kontinuierlichen Flugmodus kann mittels „Field of View“ (FOV) und der Längsüberlappung oder mit einer definierten Bildbasis das Auslösen der Bilder gesteuert werden. Hierfür wird nur der Start- und Endpunkt eines Flugstreifens angegeben und die Kamera dann entsprechend aktiviert. Bei diesem Vorgang werden folgende Parameter mit einer Auflösung von 20 ms gespeichert: Bildnummer, UTC Jahr, Monat, Tag, Stunde, Minute und Sekunde. Hinzu kommen weitere Parameter wie die Roll-, Nick- und Gierwinkel, die geographische Position (WGS 84), die Höhe relativ zum Startpunkt und die Anzahl der beobachteten GPS-Satelliten. Um diese Winkel ins Kamerakoordinatensystem umzurechnen, muss die Rotation zwischen Helikopterplattform und der Kamera angebracht werden (EUGSTER, 2007).

Die Überprüfung der 3D-Trajektorie des Modellhelikopters wurde mit der kalibrierten und verifizierten SmartStation von Leica TPS1200+ durchgeführt. Mit der Onboard-Applikation AutoPoints konnten kinematische Messungen mit einer Messfrequenz von bis ca. 5-7 Hz registriert werden. Mit Hilfe der SmartStation-Option wurden GNSS-Beobachtungen durchgeführt, wodurch das interne Zeitsystem des Tachymeters exakt auf die UTC-Zeit synchronisiert wurde und als gemeinsame Basis für die Auswertung verwendet werden konnte. Die Tachymeterbeobachtungen konnten dadurch mit einer Unsicherheit von bis zu 150 ms registriert werden. Der Drift der internen Tachymeterzeit ist hier zusätzlich zu beachten (STEMPFHUBER, 2004), da aus Konstruktionsgründen keine gleichzeitigen GNSS- und TPS-Messungen im kinematischen Modus erfolgen können.

Durch den dreimaligen autonomen Flug, wie in Abb. 3 definiert, können die Ergebnisse der einzelnen Flüge verglichen und eine allgemeine Aussage über die absolute Genauigkeit getroffen werden.

## 5 Analyse der Ergebnisse

Die Positionsdaten des Helikopters zum Zeitpunkt der Bildaufnahme wurden mit der erfassten 3D-Trajektorie des Tachymeters verglichen. Die GPS-Höhen wurden hierfür um den Offset (9m) bereinigt, der aus dem Unterschied zwischen definierter und gemessener Höhe des Startpunkts resultierte. Danach wurden die Koordinaten aus der 3D-Trajektorie für den Zeitpunkt der Bildaufnahme interpoliert. Die Differenzen aus dem Vergleich sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3: Mittlere Offsets und Streuung zwischen der GPS- und der getrackten Tachymeter-Position zum gleichen Zeitpunkt (UTC).

	Streifen 1			Streifen 2		
	X	Y	H	X	Y	H
Flug 1	-2,32 / 0,73 m	0,64 / 0,40 m	1,53 / 0,19 m	2,40 / 1,15 m	-1,62 / 0,49 m	2,06 / 0,11 m
Flug 2	-2,93 / 0,56 m	0,74 / 0,39 m	-0,17 / 0,07 m	-2,84 / 0,74 m	0,71 / 0,33 m	0,03 / 0,11 m
Flug 3	-2,30 / 0,50 m	0,41 / 0,31 m	2,24 / 0,16 m	-2,33 / 0,66 m	-1,18 / 0,44 m	1,29 / 0,10 m

Die Ergebnisse für alle Flüge und Streifen zeigen vergleichbare Ergebnisse. Die Abweichungen liegen im Meterbereich und entsprechen somit den Herstellerangaben. Die Höhendifferenzen im ersten und dritten Flug entsprechen den zu erwartenden Werten, während die Höhendifferenzen im zweiten Flug deutlich geringer ausfielen und damit als zu optimistisch angesehen werden können (vgl. Tabelle 3). Die Streuung der Messwerte um den mittleren Offset resultiert wahrscheinlich aus den GPS-Beobachtungen und der nicht exakten Zeitsynchronisation zwischen den Sensoren am Helikopter und/oder den Tachymetermessungen. Die euklidische Distanz der wePilot-Beobachtungen (GPS, INS und Kalmanfilterung) zur Flugspur zeigt eine deutlich geringere mittlere Differenz von 1 m mit einer Streuung von 30 cm (vgl. Abb. 4 4). Dies unterstützt die Annahme, dass ein Offset aus der Zeitsynchronisation resultiert und sich dementsprechend maximal in der Hauptflugrichtung X (siehe Abb. 5) auswirkt. Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass eine hohe relative Genauigkeit zwischen den Beobachtungen besteht und daher die GPS/INS Beobachtungen von Low-cost Sensoren als Näherung für die Prozessierung von UAV-Bildern verwendet werden können.

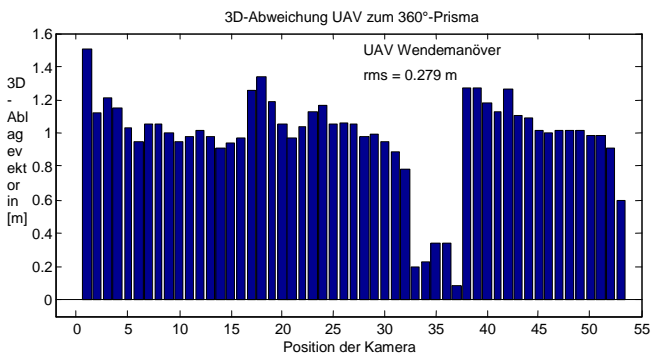


Abb. 4: der 3D-Differenzen zwischen GPS und Tachymeterbahn (Flug 3).

Der 3D-Plot der Flugspur (Abb. 5) zeigt ausserdem, dass der Helikopter bei den definierten Stoppunkten Windeinflüsse ausgleicht und sich in einem bestimmten Radius um diese Position

bewegt. Der Bahnverlauf ist während des kontinuierlichen Flugmodus sehr homogen und wäre daher geeigneter für die Bildaufnahme.

## 6 Ausblick

Ziel der vorliegenden Untersuchung war zu zeigen, dass UAVs als eine neue, unbemannte und computerbasierte steuerbare Plattform in der Photogrammetrie eingesetzt werden können. Die Verwendung von UAVs erlaubt, unzugängliche Gebiete und Gefahrengebiete zu dokumentieren, ohne menschliches Leben zu riskieren. Weiterhin können Daten aufgrund der autonomen Flugeigenschaften und der präzisen Flugplanung schneller erfasst, Kosten reduziert und Daten mit höherer Auflösung für kleinere bis mittlere Gebiete generiert werden.

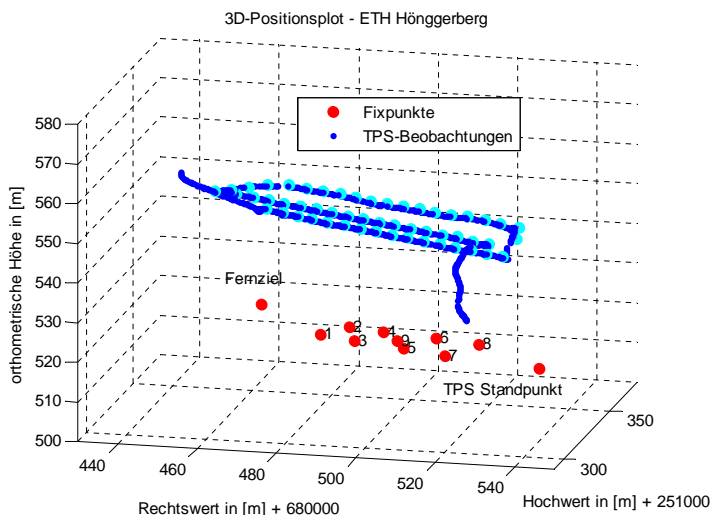


Abb. 5: Messdaten der 3D-Flugspur aus Tachymetermessungen und Bildaufnahmepunkten aus GPS-Beobachtungen (Flug 3). Außerdem zeigt das vorgestellte System zur Verifizierung der 3D bzw. 4D Genauigkeit ein Verfahren auf, das die Qualität der Flugbahn mit einem Referenzsystem vergleicht.

In zukünftigen Untersuchungen sollen ähnliche Vorhaben auch mit dem vorgestellten Open Source Mikrokopter durchgeführt werden. Diese Art von System besitzt ein hohes Potenzial, da die Einstiegskosten gegenüber professionellen und kommerziellen Modellhelikoptern und Quadrokoptern sehr gering sind. Zusätzlich bieten die Foren der Open Source Projekte eine Vielfalt von Links und Problemlösungsstrategien, die es dem versierten Entwickler vereinfachen, ein auf spezielle Anwendungen ausgerichtetes System zu entwerfen. Auf der einen Seite sind Quadrokopter aufgrund ihrer Größe und ihres Elektroantriebes in vielen Gebieten ohne großen Aufwand für eine Fluggenehmigung einsetzbar, jedoch ist ihre maximale Flugzeit und Nutzlast auf der anderen Seite deutlich eingeschränkter als bei größeren mit Verbrennungsmotor betriebenen UAVs. Unsere Untersuchungen haben gezeigt, dass Systeme wie der Copter 1B für vielfältige Anwen-

dungen bereits jetzt sehr gut kommerziell einsetzbar sind, und dass durch die relativ hohe Zuladungskapazität mehrere Sensoren integriert und verknüpft werden können. In nachfolgenden Analysen wird ein weiterer Schwerpunkt auf die Genauigkeit der Orientierungswinkel gelegt, die in der vorliegenden Untersuchung noch vernachlässigt wurde.

## 7 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei allen Mitarbeitern des IGP (ETH Zürich) und unserem Backup-Piloten, die bei der Durchführung der Messkampagne integriert waren.

## 8 Literaturverzeichnis

- CRAMER, M., 2001: Genauigkeitsuntersuchungen zur GPS/INS-Integration in der Aerophotogrammetrie. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 537, München 2001.
- EISENBEISS, H., 2004: A mini Unmanned Aerial Vehicle (UAV): System overview and image acquisition, International Workshop on Processing and Visualization using High Resolution Imagery, 18-20 November, Pitsanulok, Thailand, In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI-5/W1, (CD-ROM).
- EISENBEISS, H., NOVÁK, D., SAUERBIER, M., CHAPUIS, J. & PÜSCHEL, H., 2009: Einsatz einer autonomen Plattform und der Irrlicht Engine für die 3D-Echtzeitvisualisierung am Beispiel von Schloss Landenberg. Th. Luhmann/Ch. Müller (Hrsg.), Photogrammetrie-Laserscanning Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tag 2009, Verlag Herbert Wichmann. (im Druck)
- EUGSTER, H., 2007: Georegistrierung mittels Minidrohnen erfasster Videosequenzen – Ansätze und Genauigkeitsanalyse, SGPBF, DGPF und OVG Dreiländertagung 2007, MuttENZ, 19. – 21. Juni 2007.
- MIKROKOPTER, 2009: MikrokoPter Wiki: <http://mikrokoPter.de/ucwiki> (30. Januar 2009)
- SKALoud, J., 1999: Problems in Direct-Georeferencing by INS/DGPS in the Airborne Environment. Invited Paper at ISPRS Workshop on Direct versus indirect methods of sensor orientation. Commission III, WG III/1, Barcelona, Spain, November 25-26.
- STEMPFHUBER, W. & KIRSCHNER, H., 2008: Kinematische Leistungsfähigkeit von zielverfolgenden Tachymetern - Ein Beitrag zum Stand der Technik am Beispiel des Leica TPS1200+, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 06/2008, pp. 216-223.
- STEMPFHUBER, W., 2004: Ein integritätswahrendes Messsystem für kinematische Anwendungen, Deutsche Geodätische Kommission, Vol. C, No. 576, München.
- SURVEY-COPTER, 2009: Survey-Copter Homepage.  
<http://pagespersoorange.fr/surveycopter/eindex.htm>. (30. Januar 2009).
- VAN BLYENBURG, P., (1999): "UAVs: and Overview." *Air & Space Europe* 1(5/6): 43-47.
- WECONTROL, 2009: weControl Homepage. [www.wecontrol.ch](http://www.wecontrol.ch). (30. Januar 2009).



# Potential höchstauflösender optischer Weltraumbilder

KARSTEN JACOBSEN

*Zusammenfassung: Die Bodenauflösung von optischen Weltraumbildern wurde durch WorldVieww-1 auf 45cm und durch GeoEye auf 41cm gesteigert. Wegen einschränkender behördlicher Lizenzen für die amerikanischen Betreibergesellschaften werden die Bilder allerdings nur mit 50cm Objektpixelgröße vertrieben, was nicht weit von der tatsächlichen Objektpixelgröße schräg aufgenommener Aufnahmen entfernt ist.*

*Nach der empirischen Regel von mindestens 0,1mm Objektpixelgröße im Auswertemaßstab könnten somit topographische Karten bis zum Maßstab 1:5000 uneingeschränkt ausgewertet werden. Im Stadtgebiet von Istanbul wurden WorldView-1-Aufnahmen orientiert und für topographische Auswertungen eingesetzt. Wie mit den meisten optischen Weltraumaufnahmen erfolgte die Orientierung mit Sub-Pixelgenauigkeit, womit die geometrischen Anforderungen an die topographischen Auswertungen voll erfüllt sind. Als einziges Problem stellten sich die Objekterfassungen in Schattenbereichen dar. Besonders in den eng bebauten Innenstadtbereichen von Istanbul, mit vielen Hochhäusern, liegt ein nicht unerheblicher Prozentsatz der Objekte im Schatten. Dieses Problem konnte durch lokal wirkende Wallisfilter reduziert werden. Sie führen zwar zu etwas gewöhnungsbedürftigen Änderungen der Bilder, stellen aber die auch im Schattenbereich vorhandene Information für den menschlichen Auswerter optimal dar.*

*Mit WorldView-1 Stereobildpaaren können mit Ausnahme von Schattenbereichen Höhenmodelle ohne Probleme erstellt werden.*

## 1 Einführung

In vielen Ländern unterliegen Luftbilder der militärischen Geheimhaltung und es ist selbst für staatliche Stellen nicht immer einfach, mit Luftbildern zu arbeiten. Da die Objektauflösung von Satellitenbildern heute bis in den Bereich der Luftbilder hineinreicht, werden in den entsprechenden Ländern Satellitenbilder für topographische Auswertungen bevorzugt. Unabhängig davon ist in Gebieten, wo Bildflugzeuge nicht ohne weiteres zur Verfügung stehen, der Einsatz von Weltraumbildern für topographische Auswertungen häufig wirtschaftlicher. Der Großraum Istanbul wird seit Jahren im Abstand von 3 Monaten mit IKONOS-Aufnahmen erfasst, um Veränderungen des Gebäudebestandes nachweisen zu können und besonders in den Wassergewinnungsgebieten Gegenmaßnahmen gegen illegale Bautätigkeiten vornehmen zu können. Die Überwachung der Gebäudehöhen stößt allerdings an die Grenze der Objektauflösung von 1m. Hier könnte die Verbesserung der Auflösung auf 0,5m unter Umständen die für die Erdbebensicherheit bedeutsame Überwachung illegaler Gebäudeaufstockungen ermöglichen.

## 2 Bildorientierung und Genauigkeit der Punktbestimmung

Grundlage jeder georeferenzierten Auswertung ist die Bildorientierung. Zusammen mit den Bildern werden rationale Polynomkoeffizienten (RPC) ausgeliefert, die die direkte Sensororientierung durch das Verhältnis von Polynomen dritten Grades der Objektkoordinaten



X, Y und Z ausdrücken (JACOBSEN 2005). Die direkte Sensororientierung basiert auf GPS-Positionierung des Satelliten, Kreismessungen und Sternenkameras zur Vermeidung von Kreiseldriften. Die direkte Sensororientierung wird mit einer Standardabweichung in der Größenordnung von 3m angegeben. In der Türkei kommt allerdings der Einfluss der Datumsbestimmung des türkischen Landeskoordinatensystems zu der Positionsgenauigkeit hinzu, was die Beurteilung der absoluten Positionsgenauigkeit verhindert. Das als OR Standard 2A gelieferte Bild (auf eine Fläche mit konstanter Objekthöhe projiziert) ist wegen seiner Größe von 42435 x 66812 Pixeln in 14 Teilbilder aufgeteilt. Die Lage der Teilbilder in der Gesamtszene ist bei der Orientierung zu berücksichtigen, da sich die RPC und die Header-Daten auf die Gesamtszene beziehen.

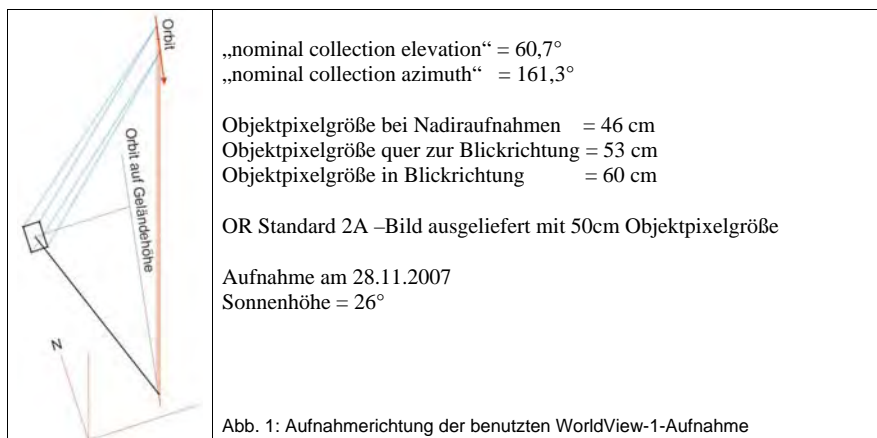


Tabelle 1: Widersprüche der Orientierung an Pass- und Vergleichspunkten [m]

Methode	Pass- punkte	an Passpunkten		Vergleichspunkte [m]		Vergleichspunkte (Passpunkte)	
		SX	SY	SX	SY	Blickrichtung	quer
RPC affin	29	0.42	0.47			(0.52	0.36)
RPC shift	29	0.53	0.50			(0.57	0.45)
RPC shift	1	0	0	0.57	0.51	0.56	0.52
RPC affin	4	0.15	0.01	0.54	0.52	0.57	0.49
RPC shift	4	0.29	0.30	0.56	0.53	0.61	0.47
RPC affin	8	0.19	0.12	0.56	0.58	0.62	0.51
RPC shift	8	0.33	0.23	0.58	0.54	0.61	0.50
3D Affin	4	0	0	0.64	0.57	0.64	0.57
3D Affin	8	0.15	0.11	0.70	0.69	0.75	0.63
3D Affin +	8	0.10	0.11	0.49	0.62	0.60	0.52
3D Affin ++	8	0.09	0.08	1.91	1.39	0.80	2.22
DLT	8	0.14	0.10	0.66	0.59	0.66	0.60

Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse der Bildorientierung. Die mit dem Hannoverschen Programm RAPORI durchgeführte Orientierung mittels der rationalen Polynomkoeffizienten erfordert nach Korrektur der geländehöhenabhängigen Lage eine horizontale Verbesserung (bias correction) in Bezug auf die Passpunkte. Diese kann durch eine einfache Verschiebung (shift) oder durch eine Affintransformation erfolgen. Tabelle 1 zeigt, dass durch die horizontale Affintransformation praktisch keine Verbesserung an den unabhängigen Vergleichspunkten erreicht wurde. Die einfache Verschiebung erfordert theoretisch nur einen Passpunkt. Mit nur einem Passpunkt wurde auch an den Vergleichspunkten bereits eine Genauigkeit von einem Objektpixel erreicht. Selbstverständlich sollte in der Praxis nicht mit nur einem Passpunkt gearbeitet werden, um die Zuverlässigkeit garantieren zu können. Durch mehr Passpunkte wurde die Genauigkeit nur unwesentlich verbessert. Zum Vergleich erfolgte auch eine Ausgleichung mit Näherungsverfahren. Die mit einer 3D-Affintransformation und der erweiterten 3D-Affintransformation (JACOBSEN 2005) erzielten Ergebnisse sind nur unwesentlich schlechter als die mit den RPC erzielten, was auf die eingeschränkte Gebietsgröße und die maximalen Höhenunterschiede von 200m zurückzuführen ist. Die 3D-Affintransformation für Originalbilder (3D Affin ++) zeigt dagegen deutlich schlechtere Ergebnisse. Aber auch die Resultate der direkten linearen Transformation (DLT) waren zufrieden stellend. Unabhängig von den teilweise akzeptablen Resultaten sind die Näherungsverfahren der 3D-Affintransformation und der DLT aber nicht gerechtfertigt, ihre Ergebnisse sind unsicher und es werden deutlich mehr und dreidimensional gut verteilt liegende Passpunkte benötigt.

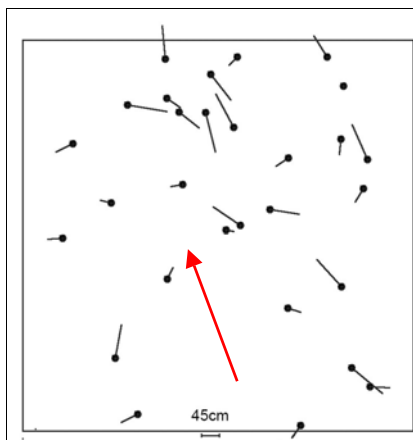


Abb. 2: Widersprüche an den Passpunkten – Orientierung mit RPC, bias-korrigiert durch Affintransformation

Szenenblickrichtung durch den roten Pfeil markiert

Quadratmittel der Widersprüche:  
in Blickrichtung: +/- 52cm  
quer zur Blickrichtung: +/- 36cm

Die grafische Darstellung der Widersprüche an den Passpunkten (Abb. 2) zeigt eine deutliche Ausrichtung in Szenenblickrichtung, was durch die Fehlerkomponente in Blickrichtung von 52cm und durch die Fehlerkomponente von 36cm quer dazu verdeutlicht wird (Tabelle 1). Nur die Fehlerkomponente in Blickrichtung ist von der eingegebenen Objekthöhe abhängig. Die Fehlerkomponente in Blickrichtung enthält nach der Fehlerfortpflanzung einen zusätzlichen Anteil gegenüber der Querkomponente von 38cm. Entsprechend des Höhenwinkels von  $60.7^\circ$  ist dieses durch einen Fehlereinfluss der Objekthöhen von  $38\text{cm} / \tan 60.7^\circ = 63\text{cm}$  zu erklären. Die

verwendeten Objekthöhen werden auch mit einer Standardabweichung in dieser Größenordnung abgeschätzt. Dementsprechend liegt der Fehleranteil der Lagekoordinatenbestimmung durch WorldView-1-Aufnahmen in der Größenordnung von bis zu 36cm, wobei die Lagekoordinaten der Pass- und Vergleichspunkte auch nicht als fehlerfrei anzusehen sind.

### 3 Objekterkennung und topographische Auswertung

Mit 50cm Objektpixelgröße entspricht die Objektinformation einem Luftbild mit einem Maßstab von 1:25 000 unter der Voraussetzung einer Bildpixelgröße von 20µm. Im Vergleich zu digitalen Aufnahmen entspricht das Informationspotential analoger Luftbilder eher einer Pixelgröße von 26µm (JACOBSEN 2008), so dass auch ein analoges Luftbild im Maßstab 1:20 000 zum Vergleich herangezogen werden könnte. Die Intergraph DMC erzielt eine Objektpixelgröße von 50cm aus einer Flughöhe von 5000m und die Microsoft Vexcel UltraCamX aus einer Flughöhe von 6900m. Damit liegt die Objektauflösung der WorldView-1-Aufnahmen im Bereich normaler Luftbilder.



Abb. 3: Gebäudeauswertung mit WorldView-1



Abb. 4: Gebäudebestand in der Karte 1:5000

Im Bereich des Stadtgebietes von Istanbul wurden mittels eines WorldView-1-Orthofotos die Gebäude erfasst (Abb. 3) und mit einer Luftbildauswertung basierend auf original digitalen Bildern mit 20cm Objektpixelgröße verglichen (Abb. 4). Sowohl die Anzahl der erfassten Gebäude als auch die Gebäudedetails unterscheiden sich praktisch nicht. Ein detaillierter Vergleich zeigte, dass die wenigen Gebäude, die nicht mit der WorldView-1-Aufnahme erfasst wurden, bei der Auswertung übersehen wurden. Sie ließen sich ohne Probleme nachträglich

erfassen. Auf der anderen Seite ließen sich zusätzlich neue Gebäude kartieren. Die WorldView-1-Aufnahme ist somit ohne Einschränkungen für den Kartenmaßstab 1:5000 geeignet.

Im Innenstadtbereich gab es wegen der Sonnenhöhe von nur  $26^\circ$  Probleme mit der Objekterfassung im Schatten von Hochhäusern (Abb. 5a). Hier half eine lokal wirkende Wallisfilterung (Abb. 5b). Die lokal wirkende Wallisfilterung betont die Kontrastunterschiede und gleicht die mittleren Grauwerte an. Die gefilterten Bilder sind zwar gewöhnungsbedürftig, lassen sich aber zumindest in den Schattenbereichen besser auswerten.

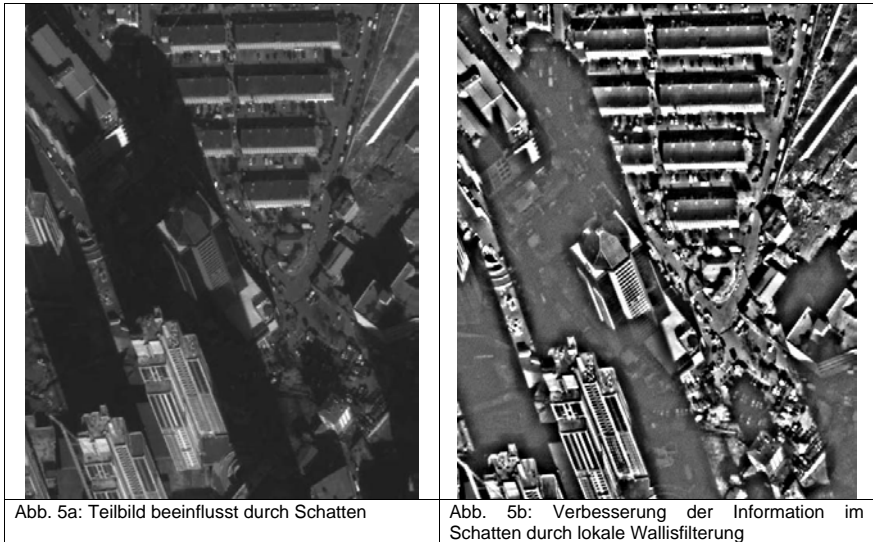


Abb. 5a: Teilbild beeinflusst durch Schatten

Abb. 5b: Verbesserung der Information im Schatten durch lokale Wallisfilterung

## 4 Erstellung von Höhenmodellen

Mit dem WorldView-1 Testdatensatz Morrison, der von DigitalGlobe im Internet zur Verfügung gestellt ist, wurde die Erstellung von Höhenmodellen untersucht. Dieser Datensatz hat leider keine ausreichend exakte Passpunktdefinition, so dass keine Sub-Pixelgenauigkeit der Bildorientierung erreicht werden konnte. Das Stereobildpaar hat ein für offenes Gelände übliches Höhen-Basis-Verhältnis von 1,6. In bebautem Gebiet hat das den Nachteil größerer Verdeckungen. Die automatische Bildzuordnung durch kleinste Quadrate mit Gebietswachstum führte zu ähnlichen Ergebnissen, die auch mit anderen sehr hoch auflösenden Satellitenbildpaaren erzielt wurden. In bebauten Gebieten kommt es nur zu sehr lokalen Ausfällen der Zuordnung, die auf Gebiete mit nahezu konstanten Grauwerten zurückzuführen sind. Dagegen ist die automatische Bildzuordnung in mit Wald bestandenen gebirgigen Schattenbereichen schwierig, zumal zum Aufnahmezeitpunkt, den 25.11.2007, die Sonnenhöhe nur  $27,6^\circ$  erreichte.

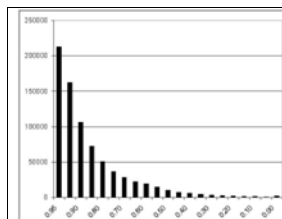


Abb. 6: Histogramm der Korrelationskoeffizienten in bebautem Gebiet

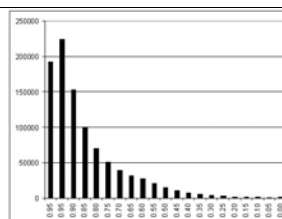


Abb. 7: Histogramm der Korrelationskoeffizienten in gebirgigem Gebiet



Abb. 8: Histogramm der Grauwerte in der gesamten Szene

Die in den Abbildungen 6 und 7 dargestellten Verteilungen der Korrelationskoeffizienten zeugen von einem guten Bildkontrast, wie auch die in Abbildung 8 präsentierte Grauwertverteilung in der gesamten Szene zufrieden stellend ist. Es wurden nur die Objektpunkte, die mit mindestens einem Korrelationskoeffizienten von 0,6 zugeordnet wurden, akzeptiert. Wie sich aus Abbildung 9 ergibt, ist die Grauwertverteilung in den nicht zugeordneten Teilgebieten so unzureichend, dass auch eine Filterung nicht zu besseren Ergebnissen führen kann.

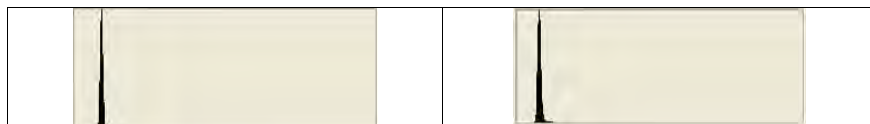


Abb. 9: Histogramme der Grauwerte in den nicht zugeordneten Gebieten  
links: bebaute Gebiete – Mittelwert 22,8, Streuung 1,2  
rechts: bewaldetes Gebirge im Schatten – Mittelwert 19,3, Streuung 1,8

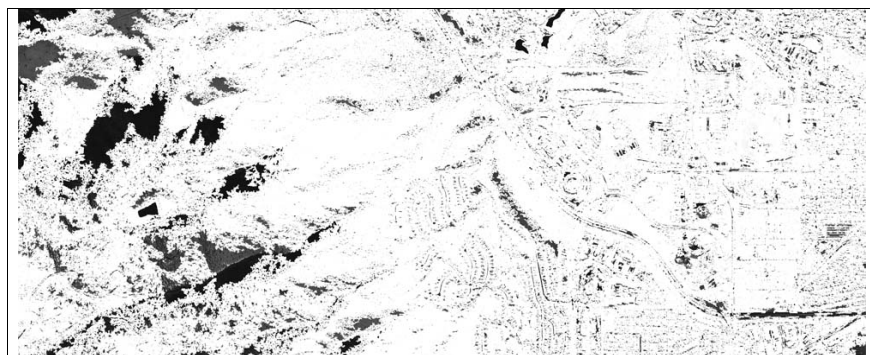


Abb. 10: automatische Bildzuordnung    weis = zugeordnete Punkte – schwarz = nicht akzeptiert



Abb. 11: Korrelationskoeffizienten der automatischen Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate: Grauwert 255 = Korrelationskoeffizient = 1,0  
Grauwert 51 = Korrelationskoeffizient = 0.6



Abb. 12: untersuchtes Teilgebiet

Die Korrelationsausfälle in den bebauten Gebieten sind unproblematisch, sie sind klein und beschränken sich praktisch auf ebene Flächen, die häufig asphaltiert sind. Anders sieht es in den Schattenbereichen der Gebirgsregion aus, hier sind die Ausfallsbereiche größer und nicht eben. Mit den vorhandenen Szenen kann das Problem nicht gelöst werden. In den Gebirgsregionen sollten Aufnahmen mit größerer Sonnenhöhe bevorzugt werden oder Zeitpunkte mit geringem Dunst, der die Schatten aufhebt.

Die automatische Bildzuordnung mit WorldView-1-Aufnahmen, die eine Objektpixelgröße von etwa 50cm haben, führt in den bebauten Gebieten zu ausreichenden Details (Abb. 13). Hier reicht in der Regel der übliche Objektpunktabstand von 3 Objektpixeln, entsprechend 1,5m aus. Eine dichtere Punktlage führt bei der flächenbasierten Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate nur zu höheren Korrelationen benachbarter Objektpunkte. Falls Wert auf die

exakte Gebäudestruktur gelegt wird, sollte auf Bildzuordnungsverfahren, wie sie in HIRSCHMÜLLER 2008 beschrieben werden, zurückgreifen.

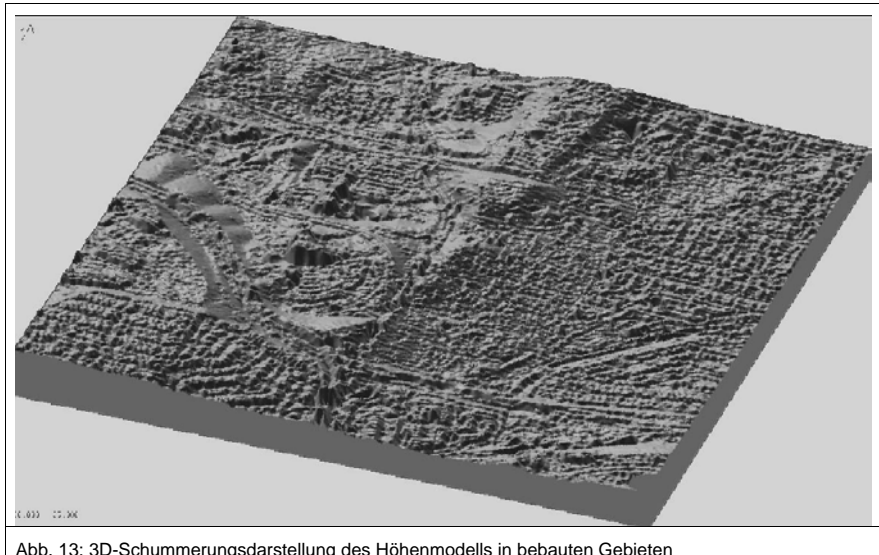


Abb. 13: 3D-Schummerungsdarstellung des Höhenmodells in bebauten Gebieten

## 5 Schlussfolgerung

Die panchromatischen WorldView-1-Aufnahmen weisen mit 50cm Objektpixelgröße eine Auflösung auf, die im Bereich üblicher Luftbildaufnahmen liegt. Sowohl die geometrische Eigenschaft als auch die Objekterkennung ist vergleichbar. Auch mit automatischer Bildzuordnung werden entsprechende Ergebnisse erzielt. Die Verwendung von sehr hoch aufgelösten Satellitenbildern oder Luftbildern ist somit nur von der Verfügbarkeit der Aufnahmen und den finanziellen Rahmenbedingungen abhängig.

## 6 Literaturverzeichnis

- HIRSCHMÜLLER, H., 2008: Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 2/2008
- JACOBSEN, K., 2005: Vergleich der Orientierungsverfahren für Weltraumaufnahmen, DGPF Jahrestagung 2005
- JACOBSEN, K., 2008: Geometrisches Potential und Informationsgehalt von großformatigen digitalen Luftbildkameras, DGPF Jahrestagung 2008



# Photogrammetrische Schrägluftbilder mit dem Aerial Oblique System AOS

ALBERT WIEDEMANN<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Das Aerial Oblique System AOS wurde entwickelt, um die Nachfrage nach Schrägluftbildern, die photogrammetrischen Anforderungen gerecht werden, zu befriedigen. Während sich andere auf dem Markt befindliche Systeme entweder auf handelsübliche Kameras und einfache Navigationssysteme stützen, verwendet das AOS hochwertige, kalibrierte Mittelformatkameras. Die Verwendung weiterer photogrammetrischer Komponenten wie einem hochwertigen DGPS/INS-System, einer kreisel-stabilisierten Plattform und die Anbindung an ein photogrammetrisches Flugführungssystem erlaubt die Einbindung in den laufenden photogrammetrischen Prozess, mindert das technische Risiko der Entwicklung und reduziert die anfallenden Investitionskosten. Vorgestellt werden hier die Ergebnisse von Testflügen mit dem System.*

## 1 Einleitung

Es gibt eine Nachfrage nach systematisch erstellten Schrägluftbildern mit photogrammetrischen Qualitäten, besonders zur Dokumentation von Fassaden in städtischen Bereichen. Anforderungen stehen neben der Texturierung von 3D Stadtmodellen in den Bereichen Denkmalschutz, Küstenschutz, Dokumentation punktueller und linearer Objekte, Planung, Immobilienvermarktung etc. Einen guten Überblick über die derzeit auf dem Markt befindlichen Systeme bietet PETRIE (2009). Des Weiteren gibt es einige Bestrebungen im Bereich des direkten Messens in den Schrägbildern (HÖHLE 2008).

Zur effizienten Erfassung dieser Bilder wurde von Alpha Luftbild und Rollei Metric in Zusammenarbeit mit der BSF Swissphoto das Schrägbildsystem (Aerial Oblique System) AOS entwickelt.

Drei synchron auslösende Kameras sind zu einem drehbaren Kameraarm zusammengefasst. Nach jeder Aufnahme kann der Arm horizontal um 90° gedreht werden, bevor das nächste Bildtrippel aufgenommen wird. So können mit drei Kameras Bilder in ähnlicher Form aufgenommen werden, wie sonst nur mit einem 5-Kamera-System (Maltheserserkreuz).

Das System ist in jedem Bildflugzeug ver-

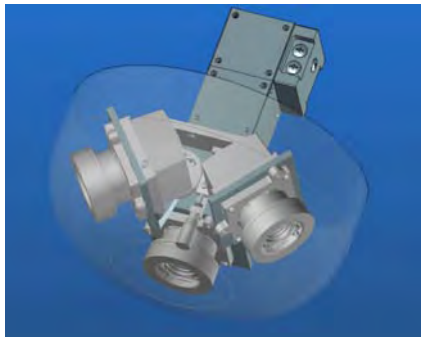


Abb.1: Kameraanordnung

---

<sup>1</sup> Albert Wiedemann, BSF Swissphoto GmbH, Mittelstr. 7, 12529 Schönefeld,  
e-mail: albert.wiedemann@bsf-swissphoto.com



wendbar, besondere Umbaumaßnahmen sind nicht erforderlich. Es ist auch möglich das System in Kombination mit hoch auflösenden metrischen Kameras (Vexcel Ultracam) und ALTM-Systemen zu betreiben.

## 2 Das System

Zu den Designideen gehörte ein flexibles, offenes und modulares Konzept was die Verwendung erprobter, photogrammetrischer Komponenten (stabilisierte Plattform, Flugsteuerungssystem, DGPS/INS-System) umfasst, sowie die Verarbeitung in einer photogrammetrischen Prozesskette ermöglichen soll. Des Weiteren erlaubt das modulare Konzept die spätere Anpassung des Systems an technologische Weiterentwicklungen.

### 2.1 Kameras

Das Schrägaufnahmesystem AOS verfügt derzeit über drei kalibrierte Rollei Metric AIC 39 Megapixel-Kameras (Phase One Rückteile), jeweils mit einem 47 mm Objektiv (Schneider Kreuznach). Eine Kamera wird senkrecht eingebaut, eine geneigt nach vorne, eine geneigt nach hinten. Die abgebildeten Bereiche der drei Kameras überlappen sich geringfügig. Die Bilder der drei Kameras lassen sich zu einem schmetterlingsförmigen Bild zusammensetzen (Abb. 2).



Abb.2: Bilder-Schmetterling aus drei zusammengesetzten Bildern eines Aufnahmezeitpunktes

Die drei Kameras werden in einer Kugelkalotte untergebracht, welche sich im Flug um jeweils 90° dreht und somit in der Folge jeweils drei Bilder längs und drei Bilder quer zur Flugrichtung aufnimmt und dabei jeweils einen Öffnungswinkel von über 110° abdeckt. Die Kalotte wird ausfahrbar in einer stabilisierten Plattform in der für Bildflugzeugen üblichen Bodenluke eingebaut.

Somit sind die Kameras während des Starts und der Landungen nicht dem Fahrtwind und eventueller Verschmutzungen ausgesetzt.

## 2.2 Weitere Systemkomponenten

Bei der BSF Swissphoto verwenden wir das Kamerasystem in einer Kreiselstabilisierten Plattform SM2000. Das System ist dabei an das Navigationssystem CCNS4 von IGI angebunden. Neben den Bildern werden auch die Daten der äußeren Orientierung mit aufgezeichnet (IGI Aerocontrol II). Das Sensorsystem ist an ein Datenrack mit den Rechnern angebunden. Die Daten werden redundant intern und auf austauschbaren Festplatten in Wechselrahmen gespeichert.



Abb. 3: Systemkomponenten (Rack, Steuerung, Sensor)

## 2.3 Bodensegment

Das Bodensegment besteht aus einem Kopierrechner mit drei Wechselrahmen für die Festplatten mit den Bilddaten. Die Kopie eines kompletten Datensatzes dauert etwa 4,5 Stunden. Des Weiteren werden gleich die Exposure-Dateien des CCNS4, die Event- und DGPS/INS-Daten und die Logfiles gesichert. Damit ist eine komplette Rekonstruktion des Geschehens im Objekt reproduzierbar.

### 3 Befliegungskonzept

Das System soll eine systematische Befliegung mit Schräg- und Senkrechtbildern für punktuelle, lineare und flächige Objekte erlauben und so flexibel wie möglich einsetzbar sein. Die das System begrenzende Faktoren sind die Bewegungsunschärfe und die Bildfolgezeit. Bei der minimalen Belichtungszeit von  $1/1000$  s (bei 120 kn, ca. 200 km/h) ergeben sich etwa 6 cm Vorwärtsbewegung. Die minimale Bildfolgezeit von 3,5 s, diese sind notwendig, um die Daten zu sichern. Je nach Einsatzprofil kann das Kamerasystem in Längs- oder Querlage oder im Rotationsmodus betrieben werden.

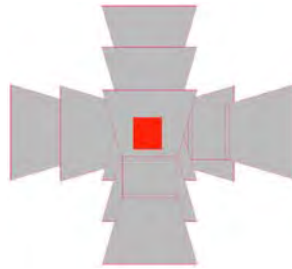


Abb.4: Kreuzbefliegung für Einzelobjekte

#### 3.1 Einzelobjekte

Für kleinräumige Einzelobjekte bietet sich der Einsatz des Systems in Längslage und die kreuzförmige Überfliegung des Objektes an. Insgesamt sind 6 Auslösepunkte auf zwei Linien erforderlich, was zusammen 18 Bilder ergibt, davon 6 mit Abbildung des Objekts. Da die Kameras nicht rotiert werden, sind Auflösungen bis ca. 5 cm GSD möglich.

#### 3.2 Linien

Bei Linienbefliegungen gibt es drei Szenarios. Entweder werden alle Objekte mit Blickrichtung in Liniengerichtung gewünscht, dann wird diese einmal entlang geflogen und die Kameras verbleiben in Längsrichtung. Dies eignet sich zum Beispiel, um bei Verkehrswegen in Fahrtrichtung Aufnahmen zu machen. Ein anderes Szenario, etwa zur Dokumentation von Steilküsten, ist bei Einstellung der Kameras auf Querrichtung und einer Befliegung parallel zur Objektklinie realisierbar. Die dritte Variante ist die Befliegung in drei Linien links, rechts und auf der Linie mit zweimal Querstellung, einmal Längsstellung. In all diesen Szenarios sind 5 cm GSD möglich, was einen Korridor von 350 m aus allen Himmelsrichtungen bedeutet. Bei geringeren Auflösungen sind natürlich breitere Korridore möglich.

#### 3.3 Flächen

Das Befliegungskonzept für flächige Objekte erlaubt die Erfassung von senkrechten und jeweils vier schrägen Luftbildern aus allen Himmelsrichtungen in einer mäanderförmigen, wie in der Photogrammetrie üblichen, **einmaligen** Überfliegung eines Gebietes. Dabei können derzeit bei einer Auslegungsgeschwindigkeit von 220 km/h Bilder mit einer Bodenauflösung von 10 cm im Nadir systematisch erfasst werden.



Abb. 5: Bild aus der Testbefliegung Potsdam vom 21.5.2008, Flughöhe ca. 700 m, 4fach verkleinert



Abb. 6: Ausschnitt aus Abb. 5, 2fach vergrößert

## 4 Erprobung

### 4.1 Bilddaten

Der erste Testflug erfolgte im Mai 2008 über Potsdam und einem Kalibrierfeld in Luckau. Die folgenden Beispiele entspringen dem Potsdamer Testflug in etwa 700 m Höhe. Es wurden dabei 5 Linien mit 70 Bildtrippeln erstellt. Die Bilder haben im Nadir eine Auflösung von 10 cm, die natürlich nach Außen hin schlechter wird (Abb. 5 und 6).

Durch die Unterschiedlichen Blickrichtungen erscheint die Übersicht der footprints sehr unübersichtlich (Abb. 7). Dies macht deutlich wie komplex das Datenmanagement für das System ist, da durch die Rotation und die geneigten Aufnahmen das übliche Bild der Footprints durchbrochen wird.

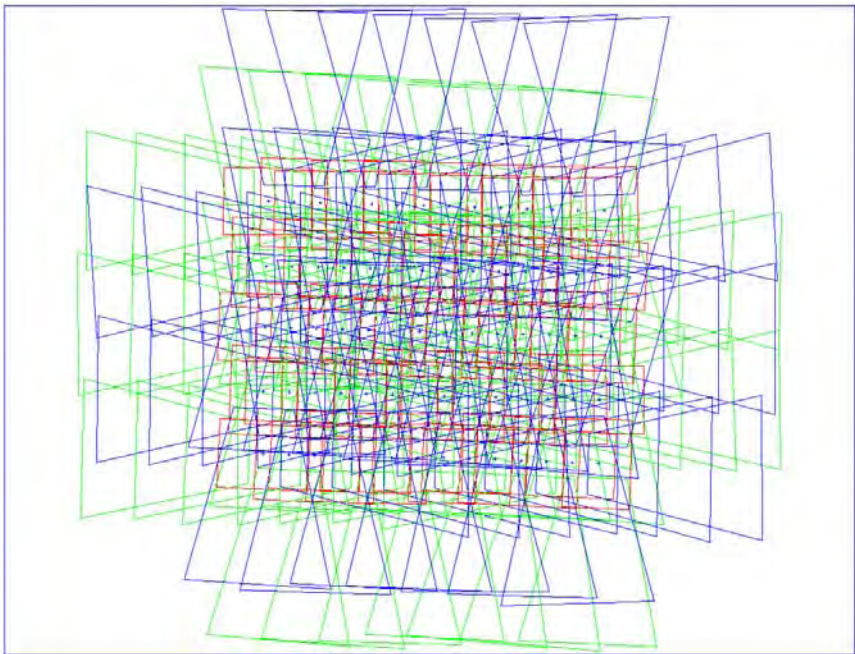


Abb. 7: Footprints der drei Kameras im Befliegungsgebiet.

### 4.2 Orientierungsdaten

Die verwendeten Kameras wurden von Rollei im Labor kalibriert und besitzen so ausreichend genaue und stabile Daten der inneren Orientierung.

Das DGPS/INS-System ist fest mit der in der Plattform sitzenden Sensorführung verbunden, wird jedoch nicht mitgedreht. Im Rahmen einer Aerotriangulation (AT) mit den Senkrechtluft-



bildern konnte so die Boreisght-Kalibrierung ermittelt werden. Eine AT mit allen Bildern eines Teilblockes ergab dann auch die Orientierungsdaten der schräg stehenden Bilder und die der anderen Senkrechtlufbilder. Unter der Annahme, dass die Drehmatrizen der Schrägbilder  $R_S$  sich durch Multiplikation der Drehmatrizen der Senkrechtlufbilder  $R_V$  mit einer festen Zweidrehung  $R_D$  ergeben, konnten so Orientierungsdaten aller Bilder zumindest genähert ermittelt werden.

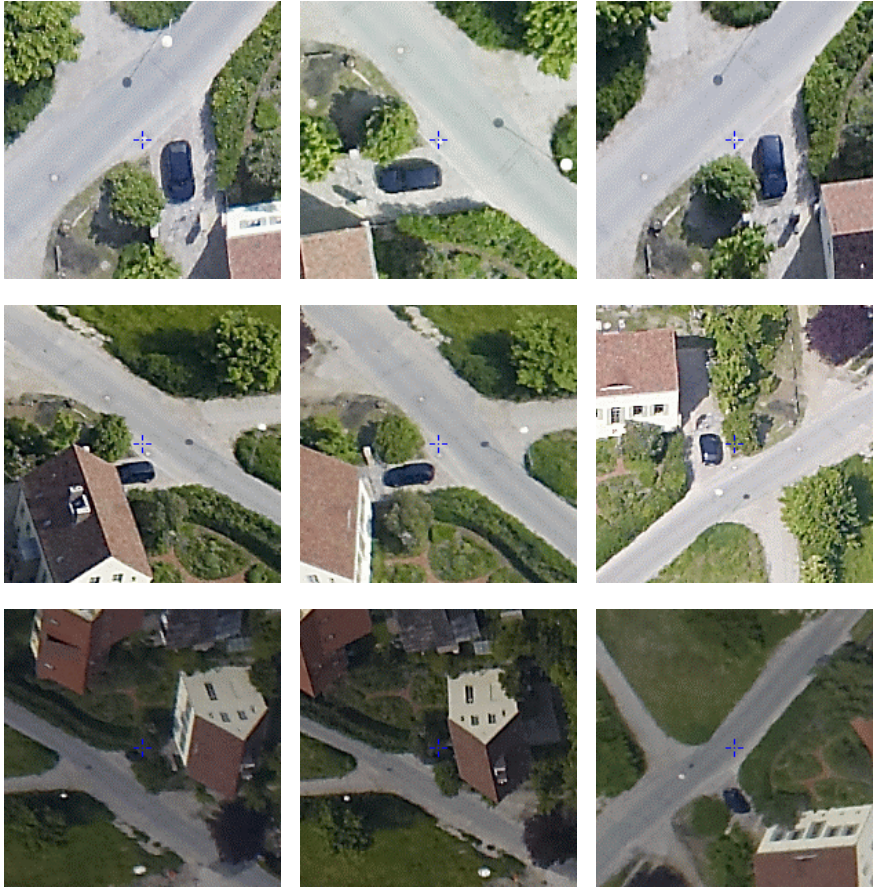


Abb. 8: Der Passpunkt 01 in den Senkrechtlufbildern (oben) wurde mathematisch in die Schrägbilder zurückgerechnet (2. und 3. Reihe).

$$R_S = R_V \cdot R_D$$

Die so berechneten Drehmatrizen bilden zusammen mit den im Rahmen der AT berechneten Projektionszentren die Daten der äußeren Orientierung. Werden Passpunkte an Hand dieser Daten und der Kollinearitätsgleichungen in die Bilder zurückprojiziert, so ergeben sich die in Abb. 8 dargestellten Restklaffungen.

Da die Aerotriangulation bisher nur auf wenigen Schrägluftbildern basiert, kann die Differenzmatrix  $R_D$  sicherlich noch genauer bestimmt und deren Stabilität im Laufe der Zeit noch genauer ermittelt werden.

## 5 Zusammenfassung

Auf der Basis erster Testflüge laufen derzeit Untersuchungen zur erreichbaren Genauigkeit der Daten der äußeren Orientierung aus der direkten Sensororientierung, sowie zur Möglichkeit die Daten im Rahmen einer Aerotriangulation zu verbessern. Des Weiteren wird an der Prozesskette zur Aufbereitung und Verwaltung der erfassten Daten gearbeitet. Weitere offene Fragen sind das Handling der unterschiedlichen Radiometrien der Bilddaten. In diesem Bereich gibt es noch eine Vielzahl offener Fragen, deren Lösung aber kein grundsätzliches Problem darstellen sollte.

## 6 Dank

Besonderer dank gilt hier den Kollegen von Alfa Luftbild, Henrik Pohl und von Rollei Metric, vor allem Dr. Peter Jürgens. Des Weiteren den am Projekt beteiligten Kollegen der BSF Swisphoto, vor allem Kenny Jaroschinski, Romy Schröder und John Moré, aber auch allen anderen Kollegen.

## 7 Literaturverzeichnis

- HÖHLE, J. ,2008: Photogrammetric Measurements in Oblique Aerial Images. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, **1/2008**, S. 7-14.
- PETRIE, G., 2009: Systematic Oblique Aerial Photography Using Multiple Digital Frame Cameras. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, **2/2009**, S. 102-107.

## Autorenverzeichnis

AGUGIARO, G. & KOLBE, T. H.: Embedding of high resolution models into a low(er) resolution digital elevation model. ....	217
ALTERMANN, W.: siehe LI, N.; FREI, M. & ALTERMANN, W.: Improvement on Lithologic Classification of remote sensing data using Knowledge-Based Classifier in Southwestern Prieska sub-basin, Transvaal Supergroup, South Africa. ....	191
AUER, S.: siehe WEGNER, J.D.; AUER, S. & SÖRGEL, U.: Analyse urbaner Gebiete mit optischen Bildern und SAR-Bildern sehr hoher Auflösung. ....	387
BACHMANN, F.: siehe NIEMEYER, I.; BACHMANN, F.; BRATSKIKH, A.; JOHN, A.; KRISTINSDÓTTIR, B.; LISTNER, C. & MARPU, P.R.: Techniques for object-based image analysis. ....	137
BAJRAMOVIC, F. & DENZLER, J.: Experimentelle Auswertung von Unsicherheitsmaßen auf relativen Posen für die Multikamerakalibrierung. .	119
BAMLER, R.: siehe WEIHING, D.; HINZ, S.; SUCHANDT, S.; RUNGE, H. & BAMLER, R.: Traffic Information Extraction using TerraSAR-X Data. ....	399
BETHMANN, F.; HERD, B.; LUHMANN, T. & OHM, J.: 3D-Erfassung von Freiformflächen aus Bildsequenzen unter Berücksichtigung von Störobjekten. ....	303
BIEWER, S.: siehe FRICKE, T.; BIEWER, S.; PERBANDT, D.; ERASMI, S. & WACHENDORF, M.: Spektrometrische Methoden als Grundlage für eine bedarfsgerechte Bewirtschaftung im Futterbau. ....	253
BOOCHS, F.; KERN, F.; SCHÜTZE, R. & MARBS, A.: Ansätze zur geometrischen und semantischen Modellierung von großen, unstrukturierten 3D-Punktmengen. ....	127
BOUAZIZ, M.; LEIDIG, M.; KNOCH, M. & GLOAGUEN, R.: Contribution of remote sensing and GIS to the qualitative assessment of eroded surfaces in the main Ethiopian rift. ....	175
BRATSKIKH, A.: siehe NIEMEYER, I.; BACHMANN, F.; BRATSKIKH, A.; JOHN, A.; KRISTINSDÓTTIR, B.; LISTNER, C. & MARPU, P.R.: Techniques for object-based image analysis. ....	137
BRUNN, A.: siehe DRAUSCHKE, M.; FÖRSTNER, W. & BRUNN, A.: MULTIDODGING: Ein effizienter Algorithmus zur automatischen Verbesserung von digitalisierten Luftbildern. ....	61
BUCK, O.: siehe MÜTERTHIES, A.; BÜSCHER, O. & BUCK, O.: DeCOVER – Konzept für nationale Geoinformationssysteme. ....	87
BÜKER, C.: siehe VÖLKER, A. & BÜKER, C.: RapidEye – Das "schnelle Auge" für das Monitoring von Cross-Compliance-Landschaftselementen? Eine Potentialanalyse mit simulierten Satellitendaten. ....	101
BÜSCHER, O.: siehe MÜTERTHIES, A.; BÜSCHER, O. & BUCK, O.: DeCOVER – Konzept für nationale Geoinformationssysteme. ....	87
BUTENUTH, M.: siehe FREY, D. & BUTENUTH, M.: Analysis of Road Networks after Flood Disasters using Multi-sensorial Remote Sensing Techniques. ..	69
CRAMER, M.: Kalibrierung und Standards für digitale Luftbildkameras. ....	295
CRAMER, M.; KRAUß, H.; JACOBSEN, K.; V. SCHÖNERMARK, M.; HAALA, N. & SPRECKELS, V.: Das DGPf-Projekt zur Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme. ....	9
DENZLER, J.: siehe BAJRAMOVIC, F. & DENZLER, J.: Experimentelle Auswertung von Unsicherheitsmaßen auf relativen Posen für	



die Multikamerakalibrierung. ....	119
DITTER, R.: siehe NEUMANN, S.; SIEGMUND, A.; DITTER, R.; HASPEL, M.; KOLLAR, I. & SIEGMUND, A.: Satellitenbilder in der Schule – von der Theorie zur praktischen Anwendung. ....	41
DRAUSCHKE, M.; FÖRSTNER, W. & BRUNN, A.: MULTIDODGING: Ein effizienter Algorithmus zur automatischen Verbesserung von digitalisierten Luftbildern. ....	61
ECKARDT, R.: siehe KNUTH, R.; ECKARDT, R.; RICHTER, N.; THIEL, C. & SCHMULLIUS, C.: FRA-SAR 2010 – Analyse von hoch auflösenden SAR Daten in den Tropen, eingebettet in die globale Waldinventur der FAO. ...	337
EHLERS, M.: siehe KLONUS, S. & EHLERS, M.: Auswirkungen der Bildfusion auf Hyperspektraldaten. ....	277
EHLERS, M.: siehe KLONUS, S. & EHLERS, M.: Vergleich von unterschiedlichen Verfahren zur Fusion von TerraSAR-X und optischen Daten. ....	327
EHLERS, M.: siehe SCHIEWE, J.; EHLERS, M.; KINKELDEY, C. & TOMOWSKI, D.: Modellierung von Unsicherheiten in klassifizierten, räumlich hoch aufgelösten Fernerkundungsszenen. ....	93
EISENBEISS, H.; STEMPPHUBER, W. & KOLB, M.: Genauigkeitsanalyse der 3D- Trajektorie von Mini-UAVs. ....	407
ERASMI, S.: siehe FRICKE, T.; BIEWER, S.; PERBANDT, D.; ERASMI, S. & WACHENDORF, M.: Spektrometrische Methoden als Grundlage für eine bedarfsgerechte Bewirtschaftung im Futterbau. ....	253
FÖRSTNER, W.: Mustererkennung in der Fernerkundung. ....	129
FÖRSTNER, W.: siehe DRAUSCHKE, M.; FÖRSTNER, W. & BRUNN, A.: MULTIDODGING: Ein effizienter Algorithmus zur automatischen Verbesserung von digitalisierten Luftbildern. ....	61
FREI, M.: siehe LI, N.; FREI, M. & ALTERMANN, W.: Improvement on Lithologic Classification of remote sensing data using Knowledge-Based Classifier in Southwestern Prieska sub-basin, Transvaal Supergroup, South Africa. .	191
FREY, D. & BUTENUTH, M.: Analysis of Road Networks after Flood Disasters using Multi-sensorial Remote Sensing Techniques. ....	69
FRICKE, T.; BIEWER, S.; PERBANDT, D.; ERASMI, S. & WACHENDORF, M.: Spektrometrische Methoden als Grundlage für eine bedarfsgerechte Bewirtschaftung im Futterbau. ....	253
GLÄßER, C.: siehe GÖTZE, C.; JUNG, A.; HENRICH, V. & GLÄßER, C.: Spektrometrische Analysen in einem Vergleich mit den physiologischen Bedingungen von schwermetallgestresster Vegetation in einem standardisierten Experiment. ....	259
GLÄßER, C.: siehe JUNG, A.; GÖTZE, C. & GLÄßER, C.: Untersuchung der Variabilität der Messsignale von vier hyper-spektralen Labor- und Feldmessgeräten. ....	267
GLOAGUEN, R.: siehe BOUAZIZ, M.; LEIDIG, M.; KNOCH, M. & GLOAGUEN, R.: Contribution of remote sensing and GIS to the qualitative assessment of eroded surfaces in the main Ethiopian rift. ....	175
GLOAGUEN, R.: siehe MAHMOOD, S.A.; SHAHZAD, F. & GLOAGUEN, R.: Remote Sensing Analysis of Quaternary Deformation and Landscape Responses Using SRTM Digital Elevation Model for Kabul River Hindukush. ....	183
GLOAGUEN, R.: siehe SHAHZAD, F.; MAHMOOD, S.A. & GLOAGUEN, R.: Morphometric analysis of Kohat Plateau (Pakistan) using Digital Elevation Models. ....	201
GLOAGUEN, R.: siehe WIJAYA, A. & GLOAGUEN, R.: Multi Source Remotely	

Sensed Data for Land Cover Classification and Biomass Estimation using Non Linear Methods. ....	207
GOETZKE, R.: siehe VOSS, K.; GOETZKE, R. & HODAM, H.: Interaktive Lernmodule zum Thema Fernerkundung – Balance zwischen analoger Bildinterpretation und umfangreichen Softwarelösungen. ....	51
GÖTZE, C.: siehe JUNG, A.; GÖTZE, C. & GLÄßER, C.: Untersuchung der Variabilität der Messsignale von vier hyper-spektralen Labor- und Feldmessgeräten. ....	267
GÖTZE, C.; JUNG, A.; HENRICH, V. & GLÄßER, C.: Spektrometrische Analysen in einem Vergleich mit den physiologischen Bedingungen von schwermetallgestresster Vegetation in einem standardisierten Experiment. ....	259
GROSS, H.; JUTZI, B. & THOENNESSEN, U.: Classification of Elevation Data based on analytical versus trained Feature Values to determine Object Boundaries. ....	315
GUPTA, S.: siehe KOCH, B.; HEINZEL, J.; GUPTA, S.; WANG, Y. & WEINACKER, H.: Extraction of forest parameter from laser data. ....	345
HAALA, N. & WOLFF, K.: Digitale photogrammetrische Luftbildkamerasysteme – Evaluation der automatischen Generierung von Höhenmodellen. ....	23
HAALA, N.: siehe CRAMER, M.; KRAUß, H.; JACOBSEN, K.; V. SCHÖNERMARK, M.; HAALA, N. & SPRECKELS, V.: Das DGPf-Projekt zur Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme. ....	9
HASPEL, M.: siehe NEUMANN, S.; SIEGMUND, A.; DITTER, R.; HASPEL, M.; KOLLAR, I. & SIEGMUND, A.: Satellitenbilder in der Schule – von der Theorie zur praktischen Anwendung. ....	41
HEINZEL, J.: siehe KOCH, B.; HEINZEL, J.; GUPTA, S.; WANG, Y. & WEINACKER, H.: Extraction of forest parameter from laser data. ....	345
HENRICH, V.: siehe GÖTZE, C.; JUNG, A.; HENRICH, V. & GLÄßER, C.: Spektrometrische Analysen in einem Vergleich mit den physiologischen Bedingungen von schwermetallgestresster Vegetation in einem standardisierten Experiment. ....	259
HERD, B.: siehe BETHMANN, F.; HERD, B.; LUHMANN, T. & OHM, J.: 3D-Erfassung von Freiformflächen aus Bildsequenzen unter Berücksichtigung von Störobjekten. ....	303
HESE, S.: Structural Analysis of Thermokarst Lake Change in Siberia with Corona and Quickbird Satellite Data. ....	79
HINZ, S.: siehe WEIHING, D.; HINZ, S.; SUCHANDT, S.; RUNGE, H. & BAMLER, R.: Traffic Information Extraction using TerraSAR-X Data. ....	399
HODAM, H.: siehe VOSS, K.; GOETZKE, R. & HODAM, H.: Interaktive Lernmodule zum Thema Fernerkundung – Balance zwischen analoger Bildinterpretation und umfangreichen Softwarelösungen. ....	51
HOEGNER, L. & STILLA, U.: Aufbereitung von mehrfachen IR-Fassadentexturen dreidimensionaler Gebäudemodelle für thermische Inspektionen. ....	227
JACOBSEN, K.: Potential höchstauflösender optischer Weltraumbilder. ....	419
JACOBSEN, K.: siehe CRAMER, M.; KRAUß, H.; JACOBSEN, K.; V. SCHÖNERMARK, M.; HAALA, N. & SPRECKELS, V.: Das DGPf-Projekt zur Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme. ....	9
JOHN, A.: siehe NIEMEYER, I.; BACHMANN, F.; BRATSKIKH, A.; JOHN, A.; KRISTINSÐÓTTIR, B.; LISTNER, C. & MARPU, P.R.: Techniques for object-based image analysis. ....	137

JUNG, A.: siehe GÖTZE, C.; JUNG, A.; HENRICH, V. & GLÄßER, C.: Spektrometrische Analysen in einem Vergleich mit den physiologischen Bedingungen von schwermetallgestresster Vegetation in einem standardisierten Experiment. .	259
JUNG, A.; GÖTZE, C. & GLÄßER, C.: Untersuchung der Variabilität der Messsignale von vier hyper-spektralen Labor- und Feldmessgeräten. ....	267
JUTZI, B.: siehe GROSS, H.; JUTZI, B. & THOENNESSEN, U.: Classification of Elevation Data based on analytical versus trained Feature Values to determine Object Boundaries. ....	315
KATTERFELD, C. & KÖNIG, G.: E-Learning Angebote und ihre Qualität. ....	33
KERN, F.: siehe BOOCHS, F.; KERN, F.; SCHÜTZE, R. & MARBS, A.: Ansätze zur geometrischen und semantischen Modellierung von großen, unstrukturierten 3D-Punktmengen. ....	127
KINKELDEY, C.: siehe SCHIEWE, J.; EHLERS, M.; KINKELDEY, C. & TOMOWSKI, D.: Modellierung von Unsicherheiten in klassifizierten, räumlich hoch aufgelösten Fernerkundungsszenen. ....	93
KLONUS, S. & EHLERS, M.: Auswirkungen der Bildfusion auf Hyperspektraldaten. .	277
KLONUS, S. & EHLERS, M.: Vergleich von unterschiedlichen Verfahren zur Fusion von TerraSAR-X und optischen Daten. ....	327
KNOCHE, M.: siehe BOUAZIZ, M.; LEIDIG, M.; KNOCHE, M. & GLOAGUEN, R.: Contribution of remote sensing and GIS to the qualitative assessment of eroded surfaces in the main Ethiopian rift. ....	175
KNUTH, R.; ECKARDT, R.; RICHTER, N.; THIEL, C. & SCHMULLIUS, C.: FRA-SAR 2010 – Analyse von hoch auflösenden SAR Daten in den Tropen, eingebettet in die globale Waldinventur der FAO. ....	337
KOCH, B.; HEINZEL, J.; GUPTA, S.; WANG, Y. & WEINACKER, H.: Extraction of forest parameter from laser data. ....	345
KOLB, M.: siehe EISENBEISS, H.; STEMPFHUBER, W. & KOLB, M.: Genauigkeitsanalyse der 3D-Trajektorie von Mini-UAVs. ....	407
KOLBE, T.: siehe AGUGIARO, G. & KOLBE, T. H.: Embedding of high resolution models into a low(er) resolution digital elevation model. ....	217
KOLLAR, I.: siehe NEUMANN, S.; SIEGMUND, A.; DITTER, R.; HASPEL, M.; KOLLAR, I. & SIEGMUND, A.: Satellitenbilder in der Schule – von der Theorie zur praktischen Anwendung. ....	41
KÖNIG, G.: siehe KATTERFELD, C. & KÖNIG, G.: E-Learning Angebote und ihre Qualität. ....	33
KRAUß, H.: siehe CRAMER, M.; KRAUß, H.; JACOBSEN, K.; v. SCHÖNERMARK, M.; HAALA, N. & SPRECKELS, V.: Das DGPf-Projekt zur Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme. ....	9
KRISTINSDÓTTIR, B.: siehe NIEMEYER, I.; BACHMANN, F.; BRATSKIKH, A.; JOHN, A.; KRISTINSDÓTTIR, B.; LISTNER, C. & MARPU, P.R.: Techniques for object-based image analysis. ....	137
KRÜCKHANS, M. & SCHMITTWILKEN, J.: Attributierte Grammatiken zur artifiziellen Verfeinerung von 3D-Stadtmodellen. ....	235
KRZYSZEK, P.: siehe REITBERGER, J.; KRZYSZEK, P. & STILLA, U.: First/Last Pulse und Full Waveform Laserscanning zur 3D Kartierung von Wäldern. ....	355
LAUSCH, A. & PAUSE, M.: Skalenspezifische hyperspektrale Fernerkundung mit dem Airborne Imaging Spectrometer for Application (AISA-EAGLE/HAWK 400-2500nm). ....	287

LEIDIG, M.: siehe BOUAZIZ, M.; LEIDIG, M.; KNOCH, M. & GLOAGUEN, R.: Contribution of remote sensing and GIS to the qualitative assessment of eroded surfaces in the main Ethiopian rift. ....	175
LEITERER, R.: siehe THIEL, C.; THIEL, CH.; REICHE, J.; LEITERER, R. & SCHMULLIUS, C.: Großflächige Waldüberwachung in Sibirien unter Verwendung von ALOS PALSAR Winter Kohärenzen und Sommer Intensitäten. ....	377
LI, N.; FREI, M. & ALTERMANN, W.: Improvement on Lithologic Classification of remote sensing data using Knowledge-Based Classifier in Southwestern Prieska sub-basin, Transvaal Supergroup, South Africa. ....	191
LISTNER, C.: siehe NIEMEYER, I.; BACHMANN, F.; BRATSKIKH, A.; JOHN, A.; KRISTINSÐÓTTIR, B.; LISTNER, C. & MARPU, P.R.: Techniques for object-based image analysis. ....	137
LUHMANN, T.: siehe BETHMANN, F.; HERD, B.; LUHMANN, T. & OHM, J.: 3D-Erfassung von Freiformflächen aus Bildsequenzen unter Berücksichtigung von Störobjekten. ....	303
MAHMOOD, S.A.: siehe SHAHZAD, F.; MAHMOOD, S.A. & GLOAGUEN, R.: Morphometric analysis of Kohat Plateau (Pakistan) using Digital Elevation Models. ....	201
MAHMOOD, S.A.; SHAHZAD, F. & GLOAGUEN, R.: Remote Sensing Analysis of Quaternary Deformation and Landscape Responses Using SRTM Digital Elevation Model for Kabul River Hindukush. ....	183
MANDELBURGER, G.: siehe RESSL, C.; MANDELBURGER, G. & PFEIFER, N.: Untersuchungen zur Verbesserung der Georeferenzierung von ALS-Streifen ohne Verwendung von GNSS-IMU-Trajektorien. ....	365
MARBS, A.: siehe BOOCHS, F.; KERN, F.; SCHÜTZE, R. & MARBS, A.: Ansätze zur geometrischen und semantischen Modellierung von großen, unstrukturierten 3D-Punktmengen. ....	127
MARPU, P.R.: siehe NIEMEYER, I.; BACHMANN, F.; BRATSKIKH, A.; JOHN, A.; KRISTINSÐÓTTIR, B.; LISTNER, C. & MARPU, P.R.: Techniques for object-based image analysis. ....	137
MATEJKA, E.: siehe REINHOLD, M.; MATEJKA, E. & SELSAM, P.: IMALYS – Konzept und Entwicklung objektorientierter Klassifikation auf Datenbankbasis. ....	157
MEINEL, G.: Konzept und Struktur eines Monitors der Siedlungs- und Freiraumentwicklung. ....	245
MÜTERTHIES, A.; BÜSCHER, O. & BUCK, O.: DeCOVER – Konzept für nationale Geoinformationsdienste. ....	87
NEUMANN, S.; SIEGMUND, A.; DITTER, R.; HASPEL, M.; KOLLAR, I. & SIEGMUND, A.: Satellitenbilder in der Schule – von der Theorie zur praktischen Anwendung. ....	41
NIEMEYER, I.; BACHMANN, F.; BRATSKIKH, A.; JOHN, A.; KRISTINSÐÓTTIR, B.; LISTNER, C. & MARPU, P.R.: Techniques for object-based image analysis. ..	137
OHM, J.: siehe BETHMANN, F.; HERD, B.; LUHMANN, T. & OHM, J.: 3D-Erfassung von Freiformflächen aus Bildsequenzen unter Berücksichtigung von Störobjekten. ....	303
PAUSE, M.: siehe LAUSCH, A. & PAUSE, M.: Skalenspezifische hyperspektrale Fernerkundung mit dem Airborne Imaging Spectrometer for Application (AISA-EAGLE/HAWK 400-2500nm). ....	287
PERBANDT, D.: siehe FRICKE, T.; BIEWER, S.; PERBANDT, D.; ERASMI, S. &	

WACHENDORF, M.: Spektrometrische Methoden als Grundlage für eine bedarfsgerechte Bewirtschaftung im Futterbau. ....	253
PFEIFER, N.: siehe RESSL, C.; MANDELBURGER, G. & PFEIFER, N.: Untersuchungen zur Verbesserung der Georeferenzierung von ALS-Streifen ohne Verwendung von GNSS-IMU-Trajektorien. ....	365
PRÄTEL, K.: Lokalisierung von Objekten in Herbarbelegen. ....	147
REICHE, J.: siehe THIEL, C.; THIEL, CH.; REICHE, J.; LEITERER, R. & SCHMULLIUS, C.: Großflächige Waldüberwachung in Sibirien unter Verwendung von ALOS PALSAR Winter Kohärenzen und Sommer Intensitäten. ....	377
REINHOLD, M.; MATEJKA, E. & SELSAM, P.: IMALYS – Konzept und Entwicklung objektorientierter Klassifikation auf Datenbankbasis. ....	157
REITBERGER, J.; KRZYTEK, P. & STILLA, U.: First/Last Pulse und Full Waveform Laserscanning zur 3D Kartierung von Wäldern. ....	355
RESSL, C.; MANDELBURGER, G. & PFEIFER, N.: Untersuchungen zur Verbesserung der Georeferenzierung von ALS-Streifen ohne Verwendung von GNSS-IMU-Trajektorien. ....	365
RICHTER, N.: siehe KNUTH, R.; ECKARDT, R.; RICHTER, N.; THIEL, C. & SCHMULLIUS, C.: FRA-SAR 2010 – Analyse von hoch auflösenden SAR Daten in den Tropen, eingebettet in die globale Waldinventur der FAO. ...	337
RUNGE, H.: siehe WEIHING, D.; HINZ, S.; SUCHANDT, S.; RUNGE, H. & BAMLER, R.: Traffic Information Extraction using TerraSAR-X Data. ....	399
SCHIEWE, J.; EHLERS, M.; KINKELDEY, C. & TOMOWSKI, D.: Modellierung von Unsicherheiten in klassifizierten, räumlich hoch aufgelösten Fernerkundungsszenen. ....	93
SCHMITTWILKEN, J.: siehe KRÜCKHANS, M. & SCHMITTWILKEN, J.: Attributierte Grammatiken zur artifiziellen Verfeinerung von 3D-Stadtmodellen. ....	235
SCHMULLIUS, C.: siehe KNUTH, R.; ECKARDT, R.; RICHTER, N.; THIEL, C. & SCHMULLIUS, C.: FRA-SAR 2010 – Analyse von hoch auflösenden SAR Daten in den Tropen, eingebettet in die globale Waldinventur der FAO. ...	337
SCHMULLIUS, C.: siehe THIEL, C.; THIEL, CH.; REICHE, J.; LEITERER, R. & SCHMULLIUS, C.: Großflächige Waldüberwachung in Sibirien unter Verwendung von ALOS PALSAR Winter Kohärenzen und Sommer Intensitäten. ....	377
SCHÖNERMARK V., M.: siehe CRAMER, M.; KRAUß, H.; JACOBSEN, K.; V. SCHÖNERMARK, M.; HAALA, N. & SPRECKELS, V.: Das DGPf-Projekt zur Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme. ....	9
SCHÜTZE, R.: siehe BOOCHS, F.; KERN, F.; SCHÜTZE, R. & MARBS, A.: Ansätze zur geometrischen und semantischen Modellierung von großen, unstrukturierten 3D-Punktmengen. ....	127
SELSAM, P.: siehe REINHOLD, M.; MATEJKA, E. & SELSAM, P.: IMALYS – Konzept und Entwicklung objektorientierter Klassifikation auf Datenbankbasis. ....	157
SHAHZAD, F.: siehe MAHMOOD, S.A.; SHAHZAD, F. & GLOAGUEN, R.: Remote Sensing Analysis of Quaternary Deformation and Landscape Responses Using SRTM Digital Elevation Model for Kabul River Hindukush. ....	183
SHAHZAD, F.; MAHMOOD, S.A. & GLOAGUEN, R.: Morphometric analysis of Kohat Plateau (Pakistan) using Digital Elevation Models. ....	201
SIEGMUND, Alexander: siehe NEUMANN, S.; SIEGMUND, A.; DITTER, R.; HASPEL, M.; KOLLAR, I. & SIEGMUND, A.: Satellitenbilder in der Schule – von der Theorie zur praktischen Anwendung. ....	41
SIEGMUND, Alexandra: siehe NEUMANN, S.; SIEGMUND, A.; DITTER, R.; HASPEL, M.; KOLLAR, I. & SIEGMUND, A.: Satellitenbilder in der Schule – von der Theorie	

zur praktischen Anwendung. ....	41
SÖRGEL, U.: siehe WEGNER, J.D.; AUER, S. & SÖRGEL, U.: Analyse urbaner Gebiete mit optischen Bildern und SAR-Bildern sehr hoher Auflösung. ....	387
SPRECKELS, V.: siehe CRAMER, M.; KRAUß, H.; JACOBSEN, K.; v. SCHÖNERMARK, M.; HAALA, N. & SPRECKELS, V.: Das DGPf-Projekt zur Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme. ....	9
STEINKE, K.-H.: Lokalisierung von Schrift in komplexer Umgebung. ....	165
STEMPFHUBER, W.: siehe EISENBEISS, H.; STEMPFHUBER, W. & KOLB, M.: Genauigkeitsanalyse der 3D-Trajektorie von Mini-UAVs. ....	407
STILLA, U.: siehe HOEGNER, L. & STILLA, U.: Aufbereitung von mehrfachen IR-Fassadentexturen dreidimensionaler Gebäudemodelle für thermische Inspektionen. ....	227
STILLA, U.: siehe REITBERGER, J.; KRZYTEK, P. & STILLA, U.: First/Last Pulse und Full Waveform Laserscanning zur 3D Kartierung von Wäldern. ....	355
SUCHANDT, S.: siehe WEIHING, D.; HINZ, S.; SUCHANDT, S.; RUNGE, H. & BAMLER, R.: Traffic Information Extraction using TerraSAR-X Data. ....	399
THIEL, C.; THIEL, CH.; REICHE, J.; LEITERER, R. & SCHMULLIUS, C.: Großflächige Waldüberwachung in Sibirien unter Verwendung von ALOS PALSAR Winter Kohärenzen und Sommer Intensitäten. ....	377
THIEL, C.: siehe KNUTH, R.; ECKARDT, R.; RICHTER, N.; THIEL, C. & SCHMULLIUS, C.: FRA-SAR 2010 – Analyse von hoch auflösenden SAR Daten in den Tropen, eingebettet in die globale Waldinventur der FAO. ...	337
THIELE, CH.: siehe THIEL, C.; THIEL, CH.; REICHE, J.; LEITERER, R. & SCHMULLIUS, C.: Großflächige Waldüberwachung in Sibirien unter Verwendung von ALOS PALSAR Winter Kohärenzen und Sommer Intensitäten. ....	377
THOENNESSEN, U.: siehe GROSS, H.; JUTZI, B. & THOENNESSEN, U.: Classification of Elevation Data based on analytical versus trained Feature Values to determine Object Boundaries. ....	315
TOMOWSKI, D.: siehe SCHIEWE, J.; EHLERS, M.; KINKELDEY, C. & TOMOWSKI, D.: Modellierung von Unsicherheiten in klassifizierten, räumlich hoch aufgelösten Fernerkundungsszenen. ....	93
VÖLKER, A. & BÜKER, C.: RapidEye – Das "schnelle Auge" für das Monitoring von Cross-Compliance-Landschaftselementen? Eine Potentialanalyse mit simulierten Satellitendaten. ....	101
VOSS, K.; GOETZKE, R. & HODAM, H.: Interaktive Lernmodule zum Thema Fernerkundung – Balance zwischen analoger Bildinterpretation und umfangreichen Softwarelösungen. ....	51
WACHENDORF, M.: siehe FRICKE, T.; BIEWER, S.; PERBANDT, D.; ERASMI, S. & WACHENDORF, M.: Spektrometrische Methoden als Grundlage für eine bedarfsgerechte Bewirtschaftung im Futterbau. ....	253
WANG, Y.: siehe KOCH, B.; HEINZEL, J.; GUPTA, S.; WANG, Y. & WEINACKER, H.: Extraction of forest parameter from laser data. ....	345
WEGNER, J.D.; AUER, S. & SÖRGEL, U.: Analyse urbaner Gebiete mit optischen Bildern und SAR-Bildern sehr hoher Auflösung. ....	387
WEIDNER, U.: Zur Bewertung von Panschärfungsverfahren. ....	111
WEIHING, D.; HINZ, S.; SUCHANDT, S.; RUNGE, H. & BAMLER, R.: Traffic Information Extraction using TerraSAR-X Data. ....	399
WEINACKER, H.: siehe KOCH, B.; HEINZEL, J.; GUPTA, S.; WANG, Y. &	

WEINACKER, H.: Extraction of forest parameter from laser data. ....	345
WIEDEMANN, A.: Photogrammetrische Schrägluftbilder mit dem Aerial Oblique System AOS. ....	427
WIJAYA, A. & GLOAGUEN, R.: Multi Source Remotely Sensed Data for Land Cover Classification and Biomass Estimation using Non Linear Methods. ..	207
WOLFF, K.: siehe HAALA, N. & WOLFF, K.: Digitale photogrammetrische Luftbildkmerasysteme – Evaluation der automatischen Generierung von Höhenmodellen. ....	23

