

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



Band 15

2006



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Vorträge
26. Wissenschaftlich-Technische
Jahrestagung der DGPF

11. – 13. September 2006
in Berlin

Geoinformatik
und Erdbeobachtung

ISSN 0942-2870

Eckhardt Seyfert, Hrsg.

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



Band 15

2006

Vorträge

26. Wissenschaftlich-Technische
Jahrestagung der DGPF

11. – 13. September 2006
in Berlin

***Geoinformatik
und Erdbeobachtung***

ISSN 0942-2870

Eckhardt Seyfert, Hrsg.

ISSN 0942-2870

Publikationen der
Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung
und Geoinformation (DGPF) e.V.
Band 15, 358 S., Potsdam 2006
Hrsg.: Eckhardt Seyfert

© Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung
und Geoinformation (DGPF) e.V.
Oldenburg 2006

Zu beziehen durch:

Geschäftsstelle der DGPF
c/o EFTAS GmbH
Ostermarkstraße 92
D-48145 Münster
Tel.: (0251) 133 070, Fax: (0251) 133 0733, E-Mail: klaus.komp@eftas.com

Druck :

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

Vorwort

Mit dem vorliegenden Tagungsband präsentiert die Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. (DGPF) die aktuellen Beiträge der 26. Technisch-Wissenschaftlichen Jahrestagung 2006, die in diesem Jahr in Berlin-Adlershof stattfindet. Die Buchreihe "Publikationen der DGPF" existiert inzwischen seit 1992 und ist für Wissenschaftler und Anwender ein aktuelles und vielfältiges Informationsmedium geworden. Auch im Zeitalter digitaler Informationen hat die Buchausgabe noch ihren Platz.

Die Jahrestagung 2006 wird in Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) durchgeführt, für deren räumliche und personelle Unterstützung ein herzlicher Dank gilt. Unter dem Motto

Geoinformatik und Erderkundung

wird die aktuelle Diskussion um die wissenschaftliche Einordnung und Identifikation der Geoinformatik im Umfeld unserer Gesellschaft angesprochen. Hier treffen kontroverse Meinungen aufeinander, mit der sich die DGPF aktiv und offen auseinandersetzen muss.

Die mit diesem Band vorgelegten Beiträge dokumentieren einmal mehr das breite Themenfeld der DGPF, das von der Satelliten- und Planetenfernerkundung bis zur Nahbereichsphotogrammetrie geht, von Fragen der Ausbildung bis hin zur Standardisierung. Die einzelnen Themenbereiche werden in Arbeitskreisen behandelt, die auch die Auswahl der Vorträge und Posterpräsentationen vornehmen. Die Arbeitskreisleiter leisten einen wesentlichen Beitrag zur wissenschaftlichen Arbeit der DGPF.

Die Jahrestagung umfasst insgesamt zwei Plenarveranstaltungen, 15 Arbeitskreissitzungen mit insgesamt 56 Vorträgen, Posterpräsentationen und Podiumsdiskussionen sowie eine begleitende Fachausstellung. Bis zum Redaktionsschluss lagen davon 42 Beiträge vor.

Im Namen des Vorstandes geht mein Dank an alle, die an der Vorbereitung und Durchführung der Jahrestagung beteiligt gewesen sind. Besonderer Dank gilt den Autoren, ohne die der Tagesband nicht existieren würde.

Thomas Luhmann
Präsident der DGPF

INHALTSVERZEICHNIS

Ausbildung

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

SCHIEWE, J., HÖDL, T. & GRENDUS, B.: FerGI: Innovative E-Learning-Materialien zur Aus- und Weiterbildung in Photogramme	9
---	---

Bildanalyse

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

BÄHR, H.-P. & REHOR, M.: Bildanalyse zur Unterstützung beim Katastrophenmanagement	21
DRAUSCHKE, M., SCHUSTER, H.-F. & FÖRSTNER, W.: Stabilität von Regionen im Skalenraum	29
GÄHLER, M. & SCHIEWE, J.: Bestimmung der Klassifikationsgüte für räumlich hoch auflösende Fernerkundungsszenen.....	37
GEHRKE, S. & HAASE, I.: Anwendung des Facetten-Stereosehens auf Bilddaten der HRSC auf Mars Express	45
HOEGNER, L., KUMKE, H., MENG, L. & STILLA, U.: Konzept zur automatischen Texturierung von Gebäudemodellen mit Thermographiebildern	57

Geoinformationssysteme

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

DONNER, R.: Ein Beitrag zu den geometrischen Grundlagen der Geoinformatik	65
DREES, R., JAKOB, A. & RUF, B.P.: CityGML in der Praxis – Nutzung von 3D-Stadtmodellen mit kommerzieller Standard-Software	73
GEHRKE, S., LEHMANN, H., KÖHRING, R., SCHOLTEN, F., WÄHLISCH, M. & ALBERTZ, J.: Neue topographische Karten der Mars-Oberfläche	83
HAUNERT, J.-H.: Aktualisierung von Geodaten in einer Multiple Representation Database	93
KUMKE, H., HOEGNER, L., MENG, L. & STILLA, U.: Zur automatischen Integration thermischer Texturen und Merkmale in Gebäudemodelle	101
LEHMANN, H., GEHRKE, S., VAN GASSELT, S., ALBERTZ, J. & NEUKUM, G.: Eine kombinierte topographisch-thematische Karte der Centauri und Hellas Montes (Mars)	109

MEIERHOLD, N.: Segmentierung von Gebäudewolken aus Laserscannerrohdaten unter Nutzung von 2D-GIS Daten 119

SCHMITTWILKEN, J., KOLBE, T.H. & PLÜMER, L.: Der Gebäudekragen – Eine detaillierte Betrachtung des Übergangs von Gebäude und Gelände 127

Internationale Standardisierung

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

KRESSE, W.: Photogrammetriestandards bei ISO, OGC, ISPRS und EuroSDR . 137

LUHMANN, T., PEIPE, J. & TECKLENBURG, W.: Zertifizierung von Software zur Bündelausgleichung in der Nahbereichsphotogrammetrie 141

WIGGENHAGEN, M.: Zielsetzung und Anwendung der Normen DIN 18740-1, 18740-2 und 18740-3 147

Interpretation von Fernerkundungsdaten

(Leitung: Dr. Horst Weichelt)

GOERNER, A., GLOAGUEN, R. & MAKESCHIN, F.: Investigation of land use and land cover change in the Southern Ecuadorian Andes 151

HÖHLIG, S., GLOAGUEN, R., NIEMEYER, I. & HEILMEIER, H.: Untersuchung der Abhängigkeit der Landnutzung von verschiedenen Standortparametern im Osterzgebirge mittels Fernerkundung und Statistik 159

KLEINSCHMIT, B., COENRADIE, B., HOSTERT, P. & HAAG, L.: Ein hybrider Verfahrensansatz zur Versiegelungskartierung 167

KOPPE, W., GNYP, M.L., LAUDIEN, R., JIA, L., LI, F., CHEN, X. & BARETH, G.: Spektrale Charakterisierung von Winterweizen für hyperspektrale Fernerkundungsanalysen 177

RIEDEL, T., THIEL, C., SCHMULLIUS, C. & FRANKE, K.-H.: Extraktion von Landbedeckungsinformationen – Ein automatisierter Ansatz mittels multitemporaler C-Band Daten 185

LESSING, R. & SCHUBERT, C.: Methodischer Ansatz zur semantischen Interoperabilität von Landbedeckungsdaten im nationalen Verbundprojekt DeCOVER 193

THIEL, C., RIEDEL, T. & SCHMULLIUS, C.: Untersuchung der Skalenabhängigkeit der Textur im urbanen Raum mit Quickbird Daten 201

WEICHEL, H., SCHULTHESS, U., GRUNDNER, S., STEIN, C., SCHELLING, K.,

HÖBER, E., GRÜNER, V. & JUNG-ROTHENHÄUSLER, F.: Ein multi-temporaler Klassifikationsansatz zur Erfassung der Landbedeckung mit RapidEye Satellitenbilddaten	211
WEIDNER, U. & MÜLLER, M.: Pansharpning – Ein Beitrag zur quantitativen Bewertung	221

Nahbereichsphotogrammetrie

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

BÄHR, J., KRACKHARDT, U.W. & DIETRICH, D.: "RaySense": Ein neuartiges strahlenoptisches Verfahren zur absoluten 3D-Vermessung spiegelnder Freiform-Flächen für den Einsatz in der Qualitätsverbesserung	229
HENZE, F., SIEDLER, G. & VETTER, S.: Integration automatisierter Verfahren der digitalen Bildverarbeitung in einem Stereoauswertesystem	239
KERSTEN, T.: Kombination und Vergleich von digitaler Photogrammetrie und terrestrischem Laserscanning für Architekturwendungen	247
KUHN, R.W., NIESE, R., CALOW, R., MICHAELIS, B. & SCHNITZLEIN, M.: Schnelle berührungslose Bestimmung der Oberflächenstruktur langrunder Körper ..	257
PEIPE, J.: Das Four Thirds-System – Bessere Bildqualität für die Photogrammetrie?	265

Fernerkundung in der Geologie

(Leitung: Dr. Hans-Ullrich Wetzel)

KÄßNER, A., GLOAGUEN, R. & STANEK, K.-P.: Geomorphologie und Neotektonik anhand von Drainagesystemen und longitudinalen Flussprofilen im Erzgebirge	269
POHL, D., WETZEL, H.-U. & GRÜNTAL G.: Tektonische Untersuchungen im Raum Vogtland-Leipzig mit Hilfe der Fernerkundung	277
REIGBER, A., ERTEN, E., GUILLASO, S. & HELLWICH, O.: I.D.I.O.T.: A Free And Easy-to-Use Software Tool For DInSAR Analysis	287

Sensoren und Plattformen

(Leitung: Dr. Rainer Sandau)

BANNEHR, L., HANNUSCH, D., JANY, S. & RUNNE, H.: Komplexes modulares System zur Ableitung von Umweltparametern	295
BAUER, M., BÖRNER, A., JAHN, H., SCHEELE, M., SCHISCHMANOW, A. & SCHUSTER, R.: Dynamische Beugungsmuster als Passpunktfelder für die geometrische Kalibration	303

BAUMANN, F., BRIEB, K. & KAYAL, H.: Untersuchung von Sensoren zur Lagebestimmung in Picosatelliten	311
BÖRNER, A., SUPPA, M., ABMAYR, T., BODENMÜLLER, T., ECKARDT, A., HIRSCHMÜLLER, H., SCHEIBE, K. & STACKENBROCK, B.: Ein modulares Sensorsystem zur multispektralen Erfassung von dreidimensionalen Objekten	319
ECKARDT, A., BÖRNER, A., JAHN, H., HILBERT, S. & WALTER, I.: Neue optische Sensorsysteme für die Erdbeobachtung	327
GRENZDÖRFER, G.: Praktische Erfahrungen mit dem digitalen Bildflugsystem PFIFF und einer Rollei AIC-45 CIR	335
JACOBSEN, K.: Herstellung eines Höhenmodells aus einem OrbView-3 Stereopaar	343
Autorenverzeichnis	351

FerGI: Innovative E-Learning-Materialien zur Aus- und Weiterbildung in Photogrammetrie und Fernerkundung

JOCHEN SCHIEWE¹, THORSTEN HÖDL² & BEATA GRENDS³

Zusammenfassung: Im Rahmen des Projektes „Fernstudienmaterialien Geoinformatik (FerGI)“ wurden innovative E-Learning-Module zur Aus- und Weiterbildung, u.a. auch für die Bereiche Photogrammetrie und Fernerkundung, entwickelt. Dieser Beitrag stellt die allgemeinen konzeptionellen Grundsätze dar, die diesen Entwicklungen zugrunde liegen. Hierbei wird nicht nur auf inhaltliche, sondern primär auf organisatorisch-strategische, technische, didaktische und ökonomische Aspekte eingegangen. Darüber hinaus werden erste Erfahrungen hinsichtlich der Nutzung und Evaluation vorgestellt. Schließlich werden Module zu Themen der Photogrammetrie und Fernerkundung im Detail beschrieben.

1 Einleitung

Die Aus- und Weiterbildungslandschaft im deutschsprachigen Raum erlebt derzeit tief greifende strukturelle und inhaltliche Diskussionen sowie entsprechende Umstellungen. Insbesondere die Einführung neuer Strukturen in der Hochschulausbildung (Stichworte: Bachelor und Master) verfolgt die Ziele einer stärkeren Flexibilisierung und Modularisierung sowie einer ständigen Aktualisierung der Lehrangebote.

In diesem übergeordneten Kontext wird dem komplementären oder substituierenden Einsatz elektronischer Medien zu Ausbildungszwecken – zusammengefasst unter dem Terminus „E-Learning“ – eine immer wichtigere Rolle beigemessen. Eine Reihe von öffentlich geförderten Initiativen in den deutschsprachigen Ländern hat in den letzten Jahren dazu beigetragen, dass eine Reihe hochwertiger E-Learning-Materialien auch in den Bereichen Geoinformatik und Geographie entwickelt worden sind. Stellvertretend hierfür seien hier die Projekte *geoinformation.net* (PLÜMER & ASCHE 2004), *gimolus* (MÜLLER & KAULE 2004), *GITTA* (LORUP & BLEISCH 2004) oder *WEBGEO* (SAURER, FUEST & GOSSMANN 2004) genannt. Für einen Überblick siehe auch SCHIEWE (2005).

Im Folgenden soll das Projekt *Fernstudienmaterialien Geoinformatik (FerGI)*, das die Implementierung, Nutzung und Evaluation von E-Learning-Modulen zu Themen der Geoinformatik verfolgt, näher vorgestellt werden. Dieses Vorhaben konnte bei der Konzeption und Implementierung auf die Erfahrungen der o.g. Vorgängerprojekte zurückgreifen. Die resultierenden konzeptionellen Grundsätze werden ebenso in Abschnitt 2 vorgestellt wie erste Erfahrungen hinsichtlich der Nutzung und Evaluation. In den Abschnitten 3 und 4 werden dann die FerGI-Module exemplarisch vorgestellt, die speziell zur Aus- und Weiterbildung in den Bereichen Photogrammetrie und Fernerkundung entwickelt worden sind. Weitere Informationen zum Projekt über diesen Beitrag hinaus sind auf der Homepage www.fergi-online.de verfügbar.

¹ apl. Prof. Dr.-Ing. Jochen Schiewe, Universität Osnabrück, Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, E-Mail: jschiewe@igf.uni-osnabrueck.de

² Dipl.-Ing. Thorsten Hödl, Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, E-Mail: hoedl@ipi.uni-hannover

³ Dipl.-Umweltwiss. Beata Grendus, Universität Osnabrück, Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, E-Mail: bgrendus@igf.uni-osnabrueck.de

2 Projekt FerGI

2.1 Organisatorische Aspekte

Das Projekt *Fernstudienmaterialien Geoinformatik (FerGI)* wird Ende 2006 nach einer Laufzeit von 3 Jahren beendet werden. Das Vorhaben ist in das Programm "Fernstudium" bei der Bund-Länder-Kommission integriert und wird zu gleichen Teilen vom Bundesministerium für Bildung und Forschung sowie dem Ministerium für Wissenschaft und Kultur des Landes Niedersachsen gefördert. In diesem Verbundprojekt sind insgesamt fünf Partner vereinigt: Für die fachliche Expertise zeichnen die Universitäten in Osnabrück und Hannover (mit zwei Instituten) sowie die Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven verantwortlich, während für den Bereich Mediendidaktik und Evaluation das Zentrum für Fernstudium und Weiterbildung der Universität Hildesheim zuständig ist.

2.2 Themen

Ein zentrales Ziel des Projektes FerGI besteht darin, sich auf aktuelle und spezielle **Themen** zu konzentrieren, wobei die komplementäre Expertise der Partner genutzt sowie Mehrfachentwicklungen und Überschneidungen mit bereits vorhandenen Materialien (z.B. Lehrbüchern) vermieden werden sollen.

Insgesamt werden 24 Module entwickelt, die punktuell Themen der Erfassung, Verwaltung, Analyse und Präsentation von räumlichen Daten sowie hierauf aufbauenden Anwendungen behandeln (siehe Abbildung 1). Es ist ganz bewusst nicht die Absicht, einen kompletten Studiengang, sondern „nur“ kleine Module mit einem **Umfang** von ca. 0,5 bis maximal 2 Leistungspunkten nach dem European Credit Transfer System (ECTS) anzubieten. Hiermit soll dem Trend zu einzelnen und locker miteinander verbundenen Einheiten entsprochen werden, der den Forderungen nach Flexibilität entgegenkommt und damit zu einer größeren Akzeptanz bei den Lehrenden und somit zu einer verstärkten Nutzung führen soll.

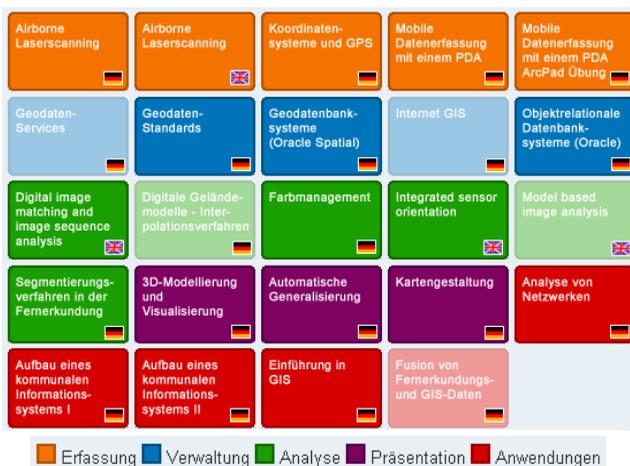


Abb. 1: Übersicht über FerGI-Module (Farbcodierung nach Themenbereichen, transparent dargestellte Module sind zum Zeitpunkt der Beitragserstellung, Juni 2006, noch in der Bearbeitung)

Primäre **Zielgruppe** für die Materialien sind Studierende, dennoch sind die Module auch für andere Personen für Weiterbildungszwecke nutzbar (siehe auch Abschnitt 2.4). In Abhängigkeit vom Thema sowie der Zielgruppe werden die Module in deutscher und/oder in englischer **Sprache** implementiert. Ausgewählte Module zu Themen der Photogrammetrie und Fernerkundung werden in den Abschnitten 3 und 4 behandelt.

2.3 Technische Gestaltung

Aus technischer Sicht verfolgt FerGI einen möglichst einfachen und flexiblen Ansatz. Grundsätzlich werden alle Materialien im HTML-Format erstellt, um eine Nutzung in allen gängigen Browsern zu ermöglichen (**standalone Basisversion**). Im Gegensatz zu einigen anderen größeren Vorhaben werden also **Lernplattform-unabhängige** Modul-Entwicklungen verfolgt. Hiermit wird den heterogenen Nutzeranforderungen Rechnung getragen, die sich hauptsächlich aus der einheitlichen Einführung von Lernplattformen an einzelnen Hochschulen oder Bildungsinstitutionen ergeben. Eine Aufgabe des Projektes besteht darin, Portierungen der erstellten „Basisversionen“ auf verschiedenen verfügbaren Lernplattformen (z.B. *Moodle*, *LearningSpace*, *ILIAS/Stud.IP*) nachzuweisen.

Für die Bereitstellung von **Testaufgaben** (idealer Weise mit automatischer Bewertung und Erstellung von Statistiken) und **Kommunikationsmöglichkeiten** (insbesondere Foren) werden für die standalone Basisversionen frei verfügbare Werkzeuge (*HotPotatoes* für Tests, *Webtropa* für Foren) eingesetzt, die aber bei optionaler Nutzung einer kommerziellen Lernplattform ausgeschaltet und durch die Funktionalitäten dieser Systeme ersetzt werden können (siehe Abbildung 2).

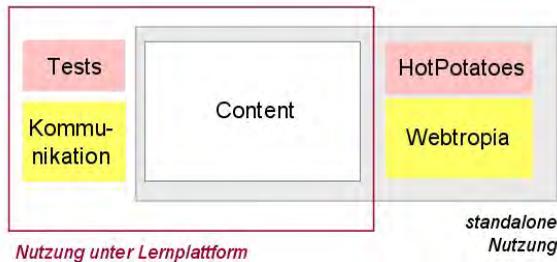


Abb. 2: Duales Konzept zur Einbindung von Test- und Kommunikationsmöglichkeiten

2.4 Nutzung

Ein weiteres Ziel des Projektes FerGI besteht darin, die erstellten Module zum einen so früh wie möglich, zum anderen auf möglichst breiter Basis einzusetzen. Hiermit soll nicht nur der Einsatz als solcher, sondern insbesondere eine Weiterentwicklung auf Grundlage von Rückmeldungen der Nutzer gewährleistet werden.

Grundsätzlich können zwei Nutzungsszenarien unterschieden werden: Zum einen erfolgt die Einbindung in die konventionelle Präsenzlehre durch einen teilweisen Ersatz oder eine Ergänzung der klassischen Lehrformen wie Vorlesungen, Seminare oder Übungen (**blended learning-Ansatz**). Während der Modul-Bearbeitung findet prinzipiell eine Betreuung mit asynchroner Kommunikation (d.h. per E-Mail oder Foren) statt.

Zum anderen ist es aber auch möglich, die Module im **Selbststudium** zu bearbeiten. In diesem Kontext werden die Materialien im Rahmen des so genannten *FerGI free*-Angebotes allen Interessierten zur freien Verfügung gestellt. Dies schließt allerdings nicht die Betreuung oder die Bereitstellung anderer Dienstleistungen (wie z.B. die Anpassung an Lernplattformen oder Übersetzungen) ein. Für die freie Nutzung werden lediglich eine formlose Registrierung sowie ein abschließendes Feedback mit Hilfe eines elektronischen Fragebogens verlangt. Der Aufruf der Module erfolgt gebündelt über die Projekt-Website <http://www.fergi-online.de>. Die Resonanz auf dieses Angebot von derzeit (Juni 2006) knapp 500 registrierten Personen aus unterschiedlichen Bereichen ist als sehr positiv einzustufen.

Die Nutzung beider beschriebener Varianten findet in der Regel **online** statt. Daneben ist aber auch eine **offline**-Nutzung (mit Einschränkungen hinsichtlich der Kommunikationsmöglichkeiten und Hyperlinks) möglich. Zusätzlich ist auch eine CD- bzw. DVD-Version geplant.

Eine Besonderheit des Projektes stellt die Portierbarkeit der Module auf einen **Personal Digital Assistant (PDA)** dar, die für bestimmte Themen bzw. Anwendungsfälle (wie z.B. für das Thema „Mobile Datenerfassung mit dem PDA“, siehe Abbildung 3) sinnvoll erscheinen. FerGI hat damit einen der bisher seltenen Beiträge zum mobilen Lernen (**mLearning**) geschaffen.

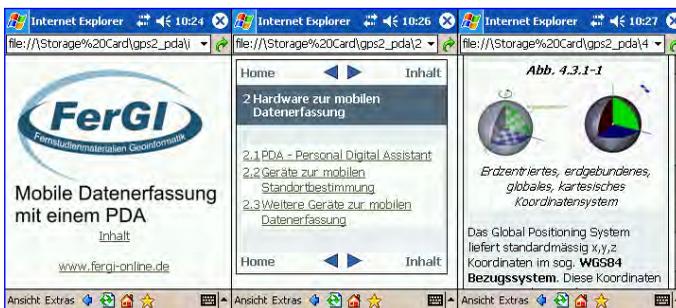


Abb. 3: Ausgewählte Screenshots eines FerGI-Moduls zur Nutzung auf einem PDA

2.5 Evaluation

Die Qualitätssicherung im Projekt wird durch eine Mischung aus formativer und summativer Evaluation gewährleistet. Neben einer internen Gegenlesung der Module durch die Projektpartner werden diverse Befragungen durch analoge oder elektronische Fragebögen durchgeführt, die die Perspektiven der Studierenden und Lehrenden trennen. Hierbei stehen neben konkreten Fragen zum Modul auch übergeordnete Aspekte wie der Stellenwert des E-Learning im Fokus.

Erste Auswertungen bezüglich des **Einsatzes von E-Learning allgemein** haben ergeben, dass die Nutzer den größten Mehrwert in der flexiblen zeitlichen Einsetzbarkeit sehen. Grundsätzlich sehen sowohl Dozenten als auch Studierende E-Learning-Materialien als Ergänzung, nicht aber als Ersatz zu konventionellen Lehrveranstaltungen an.

Hinsichtlich der **FerGI-Module** werden in der Regel der klare Aufbau sowie die inhaltliche Fokussierung auf aktuelle und wichtige Themen lobend hervorgehoben. An einigen Stellen

wird der Wunsch nach noch mehr Interaktivität geäußert. Die Tatsache, dass die Kommunikationsmöglichkeiten (insbesondere die Foren) wenig genutzt werden, lässt sich auf die Einsatzszenarien zurückführen, die in der Regel asynchron verlaufen. Insgesamt werden die FerGI-Module von den Nutzern mit der Schulnote „2,0“ bewertet.

Schließlich werden auch persönliche Gespräche mit **Verantwortlichen für Lehre** an den Hochschulen (z.B. den Vizepräsidenten für Studium und Lehre) durchgeführt, um die organisatorischen Rahmenbedingungen an den einzelnen Hochschulen zu eruieren und u.U. auf Verbesserungen hinzuwirken. Hierbei wurde deutlich, dass die Einführung moderner Medien in die universitäre Lehre immer noch Sache einzelner Dozenten bzw. Projektverantwortlicher ist, eine gezielte Förderung personeller oder finanzieller Ressourcen für einen nachhaltigen Einsatz durch die Hochschulen selbst aber kaum erfolgt.

3 Module zur Photogrammetrie

3.1 Vorbemerkungen

Für den Bereich der Photogrammetrie existiert inzwischen eine ganze Bandbreite inhaltlich heterogener E-Learning-Materialien. Einen kurzen Einblick bietet Tabelle 1 im Anhang (ohne Gewähr auf Vollständigkeit und Richtigkeit, siehe auch unter www.fergi-online.de/angebot/elearning.html). Ergänzend zu diesem vorhandenen Angebot wurden im Rahmen des Projektes FerGI am Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI) der Universität Hannover drei englischsprachige Module zu den Themen „Integrated sensor orientation“, „Digital image matching and image sequence analysis“ sowie „Image analysis I“ entwickelt. Die Module werden begleitend zum jeweiligen Vorlesungsstoff eingesetzt und dienen sowohl als Nachschlagewerk als auch zur Vertiefung.

Sämtliche Module setzen Grundkenntnisse der Photogrammetrie voraus und sind für Studenten in den höheren Semestern konzipiert. Dies führte auch zu der Entscheidung die Module in Englisch zu entwickeln. Die Fremdsprachenfähigkeit der Studenten in Bezug auf wissenschaftliche Texte soll auf diese Weise verbessert werden. Zudem dokumentieren die Module die gestiegene Internationalität der Ausbildung durch die zum WS 2005/2006 eingeführten Bachelor- und Master-Studiengänge. Ein weiterer Effekt ist, dass die englischsprachigen Module einem größeren Publikum zugänglich sind. In sämtliche Module wird als Erleichterung für die deutschsprachigen Nutzer ein Wörterbuch mit den jeweiligen Fachbegriffen eingebunden.

Wesentliche Basis für die Akzeptanz von E-Learning-Kursen sind interessante und aktuelle Inhalte. Bei der Auswahl der Modul Inhalte wurde deshalb auf eine enge Verbindung zu aktuellen Forschungsthemen am Institut geachtet. Auf diese Weise wird neben der Aktualität eine hohe fachliche Kompetenz sichergestellt. Darauf aufbauend leben gute Kurse von anschaulichen Animationen, interaktiven Übungen sowie anregenden Testaufgaben. Um die Anzahl der vom Nutzer zu installierenden Programme gering zu halten, wurde darauf geachtet, dass sämtliche Animationen im Flash-Format oder als ausführbare Datei entwickelt wurden (WIGGENHAGEN & HÖDL, 2005). Bei den in diesen Modulen eingesetzten Tests gibt es zwei Kategorien, zum einen Multiple-Choice-Tests, die automatisch ausgewertet werden und zum anderen Self-Assessment-Tests. Bei dieser Testform wird eine offene Frage gestellt, die der Nutzer eigenständig beantworten soll. Eine Korrektur durch einen Betreuer ist bewusst nicht angestrebt, vielmehr soll die Kommunikation der Nutzer untereinander angeregt werden.

3.2 Inhalte

Das Modul „**Integrated sensor orientation**“ beschreibt in sieben Kapiteln aktuelle Verfahren der Bildorientierung. Zu Beginn werden die photogrammetrischen Grundlagen zur Bildorientierung dargestellt und eine Einführung in die Bündelblockausgleichung gegeben. Das Verfahren der kombinierten Bündelblockausgleichung mit Koordinaten der Projektionszentren, bestimmt durch GPS-Positionierung, wird vorgestellt. Die Theorie der integrierten Sensororientierung mit GPS und inertialen Messsystemen folgt im Anschluss. Diese Thematik wird anhand einer praktischen Übung mit der Demoversion des Programms BLUH (BundLe block adjustment University of Hannover) vertieft. Den Schwerpunkt der zweiten Modulhälfte bildet eine ausführliche Darstellung des OEEPE Tests der integrierten Sensororientierung für einen Testblock. Die Ergebnisse des Tests werden Schritt für Schritt mit Hilfe des Programmsystems BLUH analysiert. Anhand der detaillierten Betrachtung werden die Vorzüge und Nachteile der integrierten Sensororientierung erarbeitet und ein Ausblick für zukünftige Entwicklungen gegeben.

Das Modul „**Digital image matching and image sequence analysis**“ gibt einen Überblick über die Methoden der digitalen Bildzuordnung und die Auswertung von Bildsequenzen. Im ersten Abschnitt werden die Grundlagen der digitalen Bildzuordnung durch Verfahren der Kreuzkorrelation und der kleinsten Quadrate Anpassung im Detail behandelt. Optimierungsmöglichkeiten der Ansätze z.B. durch Einbeziehung der Epipolargeometrie oder Bildpyramiden werden dargestellt. Zahlreiche Animationen erlauben es dem Nutzer die sehr theoretischen Sachverhalte in kleinen Stufen zu erschließen und beliebig zu wiederholen (siehe Abbildung 4). Der zweite Abschnitt beschäftigt sich mit der Bestimmung von sich bewegenden Objekten und deren Beschreibung durch ein Bewegungsmodell. Die Auswertung von Bildsequenzen wird generell an diversen Beispielen beschrieben. Der Schwerpunkt liegt auf der Bildsequenzanalyse von Wasseroberflächen. Dieses aktuelle Forschungsthema wird in einer praktischen Übung, in welcher im ersten Teil die Zuordnungsprozesse im Fokus stehen, intensiv beleuchtet. Im zweiten Teil der Übung wird die Bildzuordnung zweier Bilder zur Bildsequenzanalyse ausgeweitet.

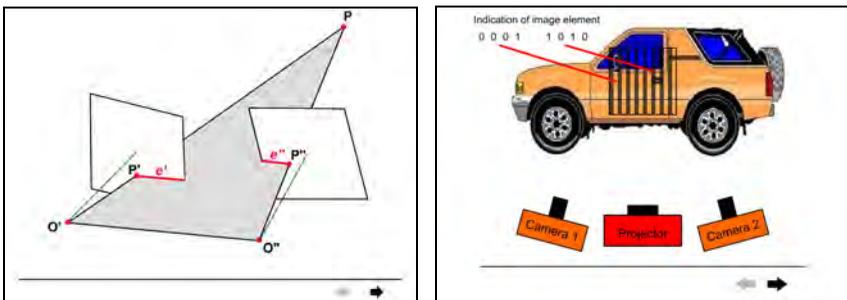


Abb. 4: Animationen zur [Epipolar-Geometrie](#) und zur [Streifenprojektion](#) – Start bei Anklicken des Links (aus dem Modul „Digital image matching and image sequence analysis“)

Eine Einführung in das weite Feld der Bildanalyse wird im Modul „**Image analysis I**“ gegeben. Der Inhalt erstreckt sich von der Bilderfassung bis zur Objektextraktion und dient somit als Basis für die modellbasierte Bildanalyse. Das Kapitel Bilderfassung beschäftigt sich mit

unterschiedlichen Beleuchtungsmodellen, räumlicher und radiometrischer Auflösung sowie den Eigenschaften unterschiedlicher Spektralkanäle. Methoden der Bildverbesserung und Bildrestauration, z.B. durch verschiedene Filtertechniken, werden im Kapitel Bildvorverarbeitung behandelt. Im Folgenden werden vielfältige Ansätze zur Extraktion von Punkten, Linien und Flächen erarbeitet. Die einzelnen Verfahren werden theoretisch erläutert und ihr praktischer Einsatz demonstriert. Abschließend wird auf die Probleme mit diesen Ansätzen und auf mögliche Verbesserungsstrategien durch Bildnachbearbeitung eingegangen.

4 Module zur Fernerkundung

4.1 Vorbemerkungen

Die Marktstudie des Harzer-Verlages und des Kompetenzzentrums für Geoinformatik (GiN) (vgl. GRENUS, HARZER & SCHIEWE, 2005) sowie eine anschließende eigene weitergehende Untersuchung haben gezeigt, dass es eine große unübersichtliche Masse an E-Learning-Materialien zum Thema Fernerkundung gibt. Einen kurzen Einblick bietet Tabelle 2 im Anhang. Bei genauerer Betrachtung der Inhalte konnte festgestellt werden, dass es sich zumeist um allgemein einführende und weniger um spezielle Sachverhalte der Fernerkundung handelt, und diese je nach Zielsetzung und Zielgruppe qualitativ und quantitativ sehr stark variieren bzw. mehr oder minder aktuell gehalten sind. Wie Tabelle 2 ebenfalls zeigt, sind fast ausschließlich Hochschulen, aber so gut wie keine Firmen an der Entwicklung beteiligt, obwohl gerade diese die neuesten Techniken und Daten vorhalten.

Vor diesem Hintergrund befassen sich im E-Learning-Projekt FerGI drei Module mit speziellen Aspekten der Fernerkundung, nämlich mit „Airborne Laserscanning“, „Segmentierungsverfahren in der Fernerkundung“ und „Fusion von Fernerkundungs- und GIS-Daten“ (siehe Abbildung 1). Diese wurden am Institut für Geoinformatik und Fernerkundung (IGF) der Universität Osnabrück entwickelt.

4.2 Inhalte

Das Modul „**Airborne Laserscanning**“ befasst sich mit flugzeuggestützten Laserscanning-Daten, die sich zu einer wichtigen Datenquelle für die Ableitung von Digitalen Höhen-Modellen und zur Landschaftsmodellierung entwickelt haben. Der Schwerpunkt dieses Moduls liegt auf der Beschreibung des Aufnahmeprinzips sowie der Qualität der Daten. Darüber hinaus werden wesentliche Aspekte der Auswertung (z.B. Normalisierung, Kombination mit Bilddaten) sowie einige Anwendungen skizziert. Da das Modul zu Projektbeginn zu allererst verwirklicht wurde, kam es bereits frühzeitig an den partizipierenden Hochschulen zum Einsatz und fungierte als Prototyp. Deshalb konnten mit diesem Modul die ersten Probleme in der Umsetzung erkannt und behoben werden. Erwähnenswert ist, dass die Firmen TopScan und TopoSys an der Gegenlesung beteiligt wurden.

Das Modul „**Segmentierungsverfahren in der Fernerkundung**“ beruht auf der Grundlage, dass insbesondere räumlich hoch auflösende Fernerkundungsdaten statt der klassischen pixelbasierten nun regionenbasierte Interpretationsansätze benötigen. Deshalb werden die unterschiedlichen Strategien zur Generierung der notwendigen Regionen beschrieben und die Ansätze zur regionen-basierten Klassifizierung theoretisch und an Praxisbeispielen vorgestellt. Das Modul wurde ebenfalls nach seiner Fertigstellung bereits mehrfach erfolgreich eingesetzt.

Das Modul „**Fusion von Fernerkundungs- und GIS-Daten**“ basiert auf der Verfügbarkeit von multi-sensoralen und multi-source Daten aus dem Fernerkundungs- und GIS-Bereich, die nach geeigneten Fusionsverfahren verlangen. Im Theorieteil dieses Moduls werden die Grundlagen zur integrativen Verarbeitung gelegt (z.B. Fusion auf verschiedenen Ebenen). Darüber hinaus werden Praxisbeispiele geschildert, die typische Datenquellen für häufige Anwendungen kombinieren.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag hat die Verfügbarkeit hochwertiger und moderner E-Learning-Materialien aus dem Projekt *Fernstudienmaterialien Geoinformatik (FerGI)* für den Bereich der Photogrammetrie und Fernerkundung demonstriert, die von interessierten Personen kostenfrei zur Aus- und Weiterbildung genutzt werden können.

Weiterhin wurde aufgezeigt, dass für einen erfolgreichen und nachhaltigen Einsatz von E-Learning-Materialien neben inhaltlichen, technischen und didaktischen Aspekten primär organisatorisch-strategische sowie ökonomische Faktoren von herausragender Bedeutung sind. Hierzu wurde ein Maßnahmenbündel als Lösungsansatz vorgestellt, das im FerGI-Projekt verfolgt wird. Zu diesen Maßnahmen gehören insbesondere:

- Schaffung vielseitiger und flexibler Einsatzszenarien (online, offline, PDA, blended learning, Selbststudium);
- Entwicklung relativ kleiner Einheiten;
- Entwicklungen basierend auf einfachen technischen Standards (z.B. unabhängig von Lernplattformen);
- Beachtung eines frühzeitigen, curricularen Einsatzes;
- freies Angebot auch für Nutzer außerhalb des Projektkonsortiums (*FerGI free*).

Bezüglich Verfügbarkeit und Nutzungskosten der erstellten Module haben sich die FerGI-Partner verpflichtet, ein entsprechendes **Verwertungsmodell** zu entwickeln. Dieses sieht vor, dass die erstellten (und möglichst ständig weiter entwickelten) Module auch nach Projektende innerhalb des Konsortiums ohne Entgelte ausgetauscht werden. Darüber hinaus haben die Partner beschlossen, auch nach Ende der Förderung weiter im Verbund FerGI zusammenzuarbeiten.

Im Hinblick auf ein langfristiges Angebot außerhalb des Projektkonsortiums erscheint ein echter Geschäftsmodell-Ansatz, der auf Gewinnertrag abzielt, generell nur für den Aufbau von Fernstudiengängen (wie z.B. die Angebote des UNIGIS-Konsortiums) aussichtsreich zu sein (KLEIMANN & WANNEMACHER, 2005). Dem stehen so genannte Betriebsmodelle gegenüber, die einen institutionell finanzierten Herstellungs- und Distributionsprozess und eine gebührenfreie Weitergabe vorsehen. Aufgrund der Situation auf dem eher kleinen und als unscharf zu bewertenden Geoinformatik-Weiterbildungsmarkt (GRENDEL, HARZER & SCHIEWE, 2005) erscheint für den Großteil der Anbieter die Konzeption und Implementierung eines Betriebsmodells angebracht (wie bisher mit *FerGI free* praktiziert). Dieses kann durch punktuelle Einnahmen aus noch zu entwickelnden Dienstleistungsangeboten bezuschusst werden (siehe auch SCHIEWE 2006). Hierfür ist aber noch der Aufbau zentraler Strukturen notwendig, die möglichst alle Entwicklungen im Bereich Geoinformatik (virtuell) bündeln sowie Vermarktungs- und andere Dienstleistungsaufgaben übernehmen können.

Grundsätzlich sollte von E-Learning-Produkten nicht erwartet werden, dass sie zu einer signifikanten Kosteneinsparung im Aus- und Weiterbildungsbetrieb oder gar einem Ersatz von Lehrpersonen führen werden. Im Fokus bei der Entwicklung und dem Einsatz von E-Learning-Materialien steht derzeit vielmehr die Schaffung einer alternativen bzw. ergänzenden Lehrform, die hinsichtlich räumlicher und zeitlicher Flexibilität der Lernenden sowie erweiterter didaktischer Mittel einen Qualitätsgewinn bewirken soll.

6 Literatur

- GRENDUS, B., HARZER, B. & SCHIEWE, J., 2005: Ergebnisse einer Umfrage unter Entwicklern, Anbietern und Endnutzern von E-Learning-Angeboten im GIS-Bereich. Beitrag zur ersten GIS-Ausbildungstagung 2005, Potsdam, auf CD-ROM.
- KLEIMANN, B. & WANNEMACHER, K., 2005: E-Learning-Geschäftsmodelle für Hochschulen. In: Breitner, M.H. & Hoppe, G. (Hrsg.): E-Learning: Einsatzkonzepte und Geschäftsmodelle, Physica Verlag, Heidelberg, 225-240.
- LORUP, E.J. & BLEISCH, S., 2004: Schweizweite GIS-Ausbildung mit GITTA – Aufbau und Organisation. In: Schiewe, J. (Hrsg.): E-Learning in Geoinformatik und Fernerkundung, Wichmann-Verlag, 33-40.
- MÜLLER, M. & KAULE, G., 2004 (HRSG.): E-Learning mit GIS- und Modellanwendungen. Ergebnisse des Projektes gimolus. Wichmann-Verlag.
- PLÜMER, L. & H. ASCHE, 2004 (HRSG.): Geoinformation – Neue Medien für eine neue Disziplin. Wichmann-Verlag.
- SAURER, H., FUEST, R. & H. GOSSMANN, H., 2004: WEBGEO: Geographie Online lernen! - Die nachhaltige Integration neuer Medien in die Grundausbildung. In: Plümer, L. & Asche, H. (Hrsg.): Geoinformation - Neue Medien für eine neue Disziplin, Wichmann-Verlag, 167-178.
- SCHIEWE, J., 2005: E-Learning-Angebote zur Aus- und Weiterbildung in der Kartographie: Status und Bewertung. Kartographische Nachrichten, 55(5), 250-257.
- SCHIEWE, J., 2006: Verwertungsmodelle für E-Learning-Materialien zur Geoinformatik. Tagungsband zur „2.GIS-Ausbildungstagung“, Potsdam, CD-ROM.
- WIGGENHAGEN, M. & HÖDL, T., 2005: Werkzeuge zur Erstellung interaktiver Lerninhalte. In: Eckhard Seyfert (Hrsg.): Publikationen der DGPF. Band 14. Rostock, 2005, S. 19-25

Anhang

Tab. 1: Ausgewählte nationale und internationale E-Learning-Materialien zur Photogrammetrie

Nationale E-Learning-Projekte in der Photogrammetrie
100online (Institut für Photogrammetrie, Uni Stuttgart) http://www.uni-stuttgart.de/100-online/ <ul style="list-style-type: none">Nahbereichsphotogrammetrie
Fernstudienmaterialien Geoinformatik (FerGI) (Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, Uni Osnabrück) www.fergi-online.de <ul style="list-style-type: none">Digital image matching and image sequence analysisImage analysisIntegrated sensor orientation
ELearning Academic Network (ELAN) Niedersachsen (Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Uni Hannover) http://www.ipi.uni-hannover.de/elan/
Internationale E-Learning-Projekte in der Photogrammetrie
Air Photo Interpretation and Photogrammetry (International Center for Remote Sensing of Environment) http://rsc-c-c.org/rscce/v1.html
Introduction into Photogrammetry (Universität Wien) http://www.univie.ac.at/1.aufbildarchiv/wgw/intro.htm
Learning Digital Photogrammetry (Universität Aalborg, Dänemark) http://ldipinter2.plan.aau.dk/
Theory of Close Range Photogrammetry (K.B. Atkinson ed.) http://www.lens.brown.edu/vision/people/leymarie/Refs/Photogrammetry/Atkinson90/Ch2Theory.html

Tab. 2: Ausgewählte nationale und internationale E-Learning-Materialien zur Fernerkundung

Nationale E-Learning-Projekte in der Fernerkundung
CASTLE - Computer Aided System for Teleinteractive Learning in Environmental Monitoring (Geographisches Institut, Uni Kiel) www.uni-kiel.de/ewf/geographie/allgemei/Hassenpflug/castle.htm
Einführung in die Fernerkundung (Instituts für Geodäsie und Geoinformationstechnik, TU Berlin) www.fpk.tu-berlin.de/%7Efpk/cbi/fernerkundung/start/index.html
Einführung in die digitale Fernerkundungsmethodik in den Geowissenschaften (IVV Geowissenschaften, Uni Münster) ivvgeo.uni-muenster.de/Vorlesung/FE_Script/Start.html
Einführung in die Fernerkundung (Geographisches Institut, Uni Kiel) www.uni-kiel.de/ewf/geographie/forum/unterric/material/einf_fe/index.htm
E-Learning zur Fernerkundung (Institut für Geographische Wissenschaften, FU Berlin) www.geog.fu-berlin.de/de/Studium/elearning.shtml <ul style="list-style-type: none">Fernerkundung und Geoinformationssysteme IFernerkundung und Geoinformationssysteme II (im Aufbau)Einführung in die Geodatenvisualisierung (im Aufbau)
E-Learning zur Fernerkundung (Interdis. Zentrum f. Musterdynamik und angewandte Fernerkundung, Uni Potsdam) www.uni-potsdam.de/maf/lectures/fe_elearn.html
Fernstudienmaterialien Geoinformatik (FerGI) (Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, Uni Osnabrück) www.fergi-online.de <ul style="list-style-type: none">Airborne Laserscanning (Deutsch und Englisch)Segmentierungsverfahren in der FernerkundungFusion von Fernerkundungs- und GIS-Daten (Englisch)
geoinformation.net (Institut für Kartographie und Geoinformatik, Uni Bonn) www.geoinformation.net <ul style="list-style-type: none">Fernerkundung
Geographie und Fernerkundung (Institut für Geographie, Uni München) www.geographie.uni-muenchen.de/iggf/multimedia/Start.htm <ul style="list-style-type: none">Einführung in FernerkundungPhysik für FernerkundlerArbeitsmethoden der FernerkundungAbbildende Stereoskopie

GEOvLEx – Webbasierte Geovisualisierungen (Uni Halle-Wittenberg)

www.geovlex.de/

- Einführende Aspekte zur Fernerkundung
- Grundlagen der Digitalen Bildverarbeitung
- Temporale Auflösung von Fernerkundungsdaten
- Spektrale und Geometrische Auflösung von Fernerkundungsdaten
- Vegetationsklassifizierung mit Fernerkundungsdaten
- Fernerkundungsdaten – Bildkatalog zu Strukturtypen mitteleuropäischer Bergbaufolgelandschaften

gimolus – GIS- und Modellgestützte Lernmodule für umweltorientierte Studiengänge (Institut für Photogrammetrie, Uni Stuttgart)

www.gimolus.de

- Primäre Erfassung (Terrestrische Vermessungsmethoden, GPS-Positionsbestimmung, Fernerkundung, Photogrammetrie, Sachdatenerfassung)

Lexikon der Fernerkundung

www.fe-lexikon.info

Satellitengeographie im Unterricht (Zentrale für Unterrichtsmedien im Internet e.V.(ZUM); DFG)

www.satgeo.de

Internationale E-Learning-Projekte in der Fernerkundung

Basics of Remote Sensing from Satellite (National Oceanic & Atmospheric Administration)

www.orbit.nesdis.noaa.gov/smcd/opdb/tutorial/intro.html

Belgian Earth Observation (BEO) (EODesk)

telsat.belspo.be/beo/flash_menu.htm

eduspace - learning with earth observation (esa)

www.eduspace.esa.int

Einführung in Fernerkundung und Digitale Bildverarbeitung (Uni Salzburg)

www.sbg.ac.at/geo/student/fernerkundung/index.htm

Introduction to Remote Sensing (University of Hawaii)

satftp.soest.hawaii.edu/space/hawaii/vfts/oahu/rem_sens_ex/rsex.spectral.1.html

NASA's Remote Sensing Tutorial (Goddard Space Flight Center (NASA))

rst.gsfc.nasa.gov

Principles of Remote Sensing (Singapore Science Center)

www.science.edu.sg/ssc/virtual_ssc.jsp?type=4&root=140&parent=140&cat=239

Remote Sensing Tutorials (Canada Centre for Remote Sensing)

www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/tutorials/tutorials_e.html

Bildanalyse zur Unterstützung beim Katastrophenmanagement

HANS-PETER BÄHR¹ & MIRIAM REHOR²

Zusammenfassung: Der Beitrag präsentiert zwei verschiedene Systeme und ihre Kombinationen, welche für Katastrophenmanagement besonders geeignet sind: Augmented Reality Systeme (AR) und Laserscanning.

AR liefert die bildliche Überlagerung der physikalischen Wirklichkeit mit den Informationen aus einer Datenbank. Dies erfordert Realtime Navigation des Beobachters im Gelände, einschließlich der Orientierung seiner Blickrichtung. Beispiele zeigen Realtime Matching sowie Anwendungen nach Erdbeben und bei Hochwasserereignissen.

Laserscanning bei Katastrophenfällen befindet sich noch in der Entwicklung. Eine besondere Herausforderung ist die Analyse geschädigter Bausubstanz. Hierzu werden Methoden zur Bildsegmentierung abgeleitet und Ergebnisse für tatsächlich zerstörte Gebäude im Trainingsgelände der Schweizer Katastrophenhilfe präsentiert.

1 Einführung

Katastrophenberichte sind heute in den Medien allgegenwärtig. Der Normalbürger hat den Eindruck, dass Katastrophen, seien es Überschwemmungen, Tsunamis oder Erdbeben, heute häufiger geschehen als früher. Der Grund für diese Wahrnehmung liegt nicht nur in der heute global besser organisierten Berichterstattung, sondern ist für viele Fälle auch objektiv nachvollziehbar: Ein ungewöhnliches Naturereignis wird nur dadurch zur Katastrophe, dass Menschen betroffen sind und Schäden entstehen. Durch hohe Bevölkerungskonzentration an vielen Orten der Erde (Stichwort „Megacities“) sind Katastrophen deshalb schon rein statistisch häufiger zu erwarten. Abgesehen von Personenopfern sind auch finanzielle Schäden im höheren Maße als in vergangener Zeit die Folge, da heute mehr hochwertige Güter geschädigt werden als früher. Die international operierenden Rückversicherungsanstalten belegen dies deutlich.

Das Thema „Katastrophen“ und damit verbunden Vorhersage, Simulation, Visualisierung und schließlich Organisation von Hilfsmaßnahmen sowie Wiederaufbau berühren in jedem einzelnen Punkt Photogrammetrie und Fernerkundung ganz direkt. Bilderzeugende Verfahren eignen sich im Kontext mit Katastrophen ganz besonders deswegen, weil sie flächenhaft arbeiten und digital sehr gut automatisierbar sind. Dies wiederum ist bei zeitkritischen Einsätzen ein nicht hoch genug einzuschätzender Vorteil.

Die technische Entwicklung heute zeigt ganz neue Möglichkeiten für Katastrophenprävention („Pre-event“) und Katastrophenmanagement („Post-event“). Im Bereich der Sensorentwicklung sind in diesem Zusammenhang Laserscanning und Augmented Reality (AR) zu nennen.

¹ Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Bähr, Universität Karlsruhe (TH), Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Englerstr. 7, 76128 Karlsruhe, e-mail: hans-peter.baehr@ipf.uni-karlsruhe.de

² Dipl.-Ing. Miriam Rehor, Universität Karlsruhe (TH), Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Englerstr. 7, 76128 Karlsruhe, e-mail: miriam.rehor@ipf.uni-karlsruhe.de

Beides sind Entwicklungen, welche für ihre operationelle Anwendung stabile Navigationssysteme voraussetzen, in diesem Falle etwa GPS (Global Positioning System) und IMU (Inertial Measurement Unit). Für die Weiterverarbeitung der Bilddaten, möglichst in Realtime, müssen sehr schnelle, tragbare Rechner in Verbindung mit den entsprechenden robusten Bildanalysetools zum Einsatz kommen.

2 Potenzial und Hardware-Komponenten von Augmented-Reality

Da über Laserscanning bereits umfangreich publiziert wurde (z.B. STEINLE (2005)) soll im folgenden die neue Technik des Augmented Reality (AR) im Vordergrund stehen.

AR liegt zusammen mit Augmented Virtuality zwischen der physikalischen Realität auf der einen Seite und der virtuellen Realität auf der anderen. Eine anschauliche Definition kann folgendermaßen formuliert werden:

„AR fügt räumliche Komponenten aus der Datenbasis eines Computersystems der visuellen Wahrnehmung des Individuums in Realtime hinzu.“

Im Prinzip ist dieser Prozess online und ubiquitär: dies heißt, das System funktioniert jederzeit und an jedem Ort.

Um das Blickfeld eines Menschen mit dem entsprechenden Inhalt aus einer Datenbasis zu überlagern, sind einige sehr anspruchsvolle Erfordernisse zu erfüllen: Realtime Navigation sowohl im kleinen Maßstab als auch im großen, die exakte Überlagerung von virtuellen Bildern mit der physikalischen Szene und schließlich Realtime Aktualisierung des entsprechenden virtuellen Bildes aus der Datenbasis in Abhängigkeit von der Blickrichtung und der Position des Menschen.

AR bietet eine große Zahl möglicher Anwendungen, welche in Kürze operationell sein werden. In Zusammenhang mit Katastrophen und Katastrophenmanagement spielen Gebäude dabei eine besondere Rolle.

Was die Hardware anbelangt, so zeigt Abbildung 1 die Komponenten, wie sie am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Universität Karlsruhe (IPF) integriert wurden. Die Hauptkomponenten sind ein tragbarer Laptop, welcher das System steuert und die Daten enthält, die in das menschliche Auge projiziert werden, sowie ein Navigationssystem bestehend aus GPS in Verbindung mit einer Inertial Measurement Unit (IMU). Differenzielles GPS liefert eine hohe Positionsgenauigkeit in der Größenordnung von einigen Zentimetern, während IMU in Verbindung mit den GPS-Daten die Position interpoliert und die drei Orientierungswinkel sowie ihre Änderungen in Verbindung mit der Bewegung des Kopfes des Beobachters liefert.

Abbildung 2 zeigt das Prinzip eines AR-Systems. Die IMU befindet sich im „Headtracker“; das Bild aus der Datenbasis wird auf den Monitoren angezeigt und direkt auf die menschliche Retina projiziert. Diese direkte Methode kann ersetzt werden durch eine indirekte Methode. In diesem Fall wird dann das menschliche Auge durch eine digitale Videokamera ersetzt, die über den Kopf des Beobachters bewegt wird. Die Überlagerung von physikalischer Realität und Bild geschieht dann auf dem Monitor des Laptops.



Abb. 1: Komponenten eines AR-Systems (STAUB, 2006)

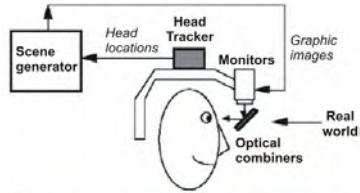


Abb. 2: AR: direktes Prinzip (AZUMA et al., 2001) mit Betrachtungssystem (unten)

Wie erwähnt ist die Überlagerung einer virtuellen Szene mit einem realen Bild auf dem Monitor des Laptops (indirektes Verfahren) oder auf der Retina des Beobachters (direktes Verfahren) eine große Herausforderung in vielerlei Hinsicht. Dies gilt besonders für Arbeiten im Gelände im Vergleich mit Arbeiten im Labor. Der Weg von einem Referenzkoordinatensystem zum Anzeige-System führt über geometrische Transformationen der verschiedenen Koordinatensysteme (GPS-Receiver, Bild, IMU) und umfasst die folgenden Schritte (LEEBMANN, 2005):

$$\mathbf{T}_{\text{Referenzsys.}}^{\text{Anzeige}} = \mathbf{P}_{\text{Kamera}}^{\text{Anzeige}} \mathbf{T}_{\text{IMU}}^{\text{Kamera}} \mathbf{T}_{\text{Quelle}}^{\text{IMU}} \mathbf{T}_{\text{GPS}}^{\text{Quelle}} \mathbf{T}_{\text{Referenzsys.}}^{\text{GPS}} \quad (1)$$

Die unbekanntenen Elemente werden entweder durch direkte Systemkalibrierung bestimmt oder indirekt innerhalb einer Ausgleichung. Die Matrix in Gleichung (1) enthält u.a. Maßstabsfaktoren, die Koordinaten des Hauptpunktes und einen Faktor für Nichterfüllung von Orthogonalität der Anzeigekoordinaten auf dem Monitor.

3 Segmentierung geschädigter Gebäudestrukturen basierend auf Laserscannerdaten

Die Klassifizierung von Schäden, die infolge von Erdbeben an Gebäuden auftreten, basierend auf flugzeuggetragenen Laserscannerdaten ist seit längerer Zeit ein Hauptforschungsthema am IPF (STEINLE & BÄHR, 1999). Um eine Klassifizierung geschädigter Gebäude durchführen zu können, müssen zunächst geeignete Modelle der geschädigten Gebäudestrukturen aus den Laserscannerdaten abgeleitet werden. Wie dabei vorgegangen werden kann, wird im Folgenden erläutert.

Zunächst wird eine Extraktion ebener Flächenelemente ausgehend von den Laserscannerdaten durchgeführt. Dafür wird ein Flächenwachstumsverfahren verwendet, das auf 2.5-D La-

serscannerrasterdaten basiert. Den Ausgangspunkt für jedes Flächensegment bildet ein Kristallisationsbereich, der die Bedingung erfüllt, dass die zugehörigen Punkte annähernd in einer Ebene liegen. Die Parameter dieser Ebene können mit Hilfe einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt werden (vgl. STEINLE (2005)).

Nach der Bestimmung des Kristallisationsbereichs wird für jedes benachbarte Pixel, das bis zu diesem Zeitpunkt noch keinem Flächensegment zugeordnet wurde, geprüft, ob es durch die aufgestellte Ebenengleichung beschrieben werden kann. Hierfür wird die ausgleichende Ebene zunächst erneut bestimmt, wobei die Menge der Punkte, die zur Bestimmung der Parameter beitragen, um den neuen Punkt erweitert wird. Anschließend wird mit Hilfe eines Globaltests mit der Testgröße

$$T_{glob} = \frac{v^T P v}{\sigma_0^2} \sim \chi_r^2 \quad (2)$$

überprüft, ob die getroffenen Annahmen im Allgemeinen korrekt sind, ob also z.B. die Annahme, dass die Punkte alle annähernd in einer Ebene liegen, richtig ist. v ist hierbei der Vektor der Verbesserungen, σ_0^2 stellt die a-priori-Varianz dar.

Des Weiteren wird für die Überprüfung der getroffenen Annahmen ein Test zur Detektion von Modellfehlern in Gauß-Markov-Modellen verwendet (z.B. BAARDA (1968), HECK (1985), NIEMEIER (2002)). Dabei wird eine Erweiterung des Ausgangsmodells vorgenommen. Hierfür wird eine neue Unbekannte y eingeführt, die einen groben Fehler in der neu hinzugekommenen Beobachtung modelliert. Die Schätzung für die neue Unbekannte y kann ohne erneute Ausgleichung aus den Ergebnissen der Ausgleichung des Ausgangsmodells berechnet werden. Im Anschluss daran wird mit Hilfe eines Parametertests überprüft, ob der Modellfehler signifikant ist. Die Nullhypothese bei diesem Test wird durch die Annahme gebildet, dass der Modellfehler nicht signifikant ist und damit das Ausgangsmodell der Wirklichkeit entspricht.

Wird die Nullhypothese bei dem Globaltest oder bei dem Verfahren zur Aufdeckung von Modellfehlern abgelehnt, so ist ein grober Fehler im Ausgangsmodell enthalten. Da das Modell vor der Hinzunahme des neuen Punktes korrekt war, muss davon ausgegangen werden, dass dieser Punkt nicht in einer Ebene mit den bisherigen Punkten liegt. Somit darf er dem betrachteten Flächensegment nicht zugeordnet werden.

Im Anschluss an die Flächensegmentierung wird ein TIN erzeugt, das auf einer ebenen Delaunay-Triangulation 2.5-dimensionaler Punkte basiert. Bei der Festlegung der Vermaschungspunkte sollen die Ergebnisse der Flächensegmentierung berücksichtigt werden. Daher werden als Grundlage für die Erzeugung des Dreiecksnetzes Punkte bestimmt, die gewährleisten, dass die erzeugten Dreiecke die Ebenen in segmentierten Bereichen möglichst exakt repräsentieren. Dies ist dann der Fall, wenn für jedes segmentierte Pixel ein Vermaschungspunkt erzeugt wird, dessen Lagekoordinaten x_p und y_p gleich den Pixelkoordinaten sind und dessen Höhe z_p so berechnet wird, dass der Punkt exakt in der extrahierten Ebene liegt. Diese Höhe kann aus der allgemeinen Ebenengleichung abgeleitet werden:

$$z_p = (d - ax_p - by_p) / c \quad (3)$$

Da die unsegmentierten Punkte bei der Dreiecksvermaschung ebenfalls berücksichtigt werden müssen, wird für jedes Pixel, das keinem Flächensegment zugeordnet wurde, ein Punkt zu der Menge der Vermaschungspunkte hinzugefügt. Die Lagekoordinaten dieses Punktes

sind wiederum gleich den Pixelkoordinaten, seine Höhe gleich der Höhe des entsprechenden Pixels. Um die Anzahl der entstehenden Dreiecke zu reduzieren werden nur die unsegmentierten Punkte und die Randpunkte der Flächensegmente als Vermaschungspunkte eingeführt.

Im Anschluss an die TIN-Generierung werden die erzeugten Dreiecke klassifiziert. Es wird dabei für jedes Dreieck überprüft, ob alle seine Eckpunkte bei der Flächensegmentierung dem gleichen Segment zugeordnet wurden und das Dreieck somit in der zugehörigen Ebene liegt. Ist dies der Fall, so handelt es sich bei dem Dreieck um ein *Ebenendreieck*, da es einen Teil einer segmentierten Ebene repräsentiert. Wurden alle drei Punkte eines Dreiecks bei der Flächensegmentierung einer Fläche zugewiesen, gehören sie aber nicht alle drei dem gleichen Segment an, so wird das Dreieck als *Ebenenverbindungs-dreieck* bezeichnet, da es die Verbindung zwischen zwei oder drei ebenen Flächen darstellt. Sobald ein Dreieck auch nur einen nicht segmentierten Punkt enthält, wird es der Klasse der *Trümmendreiecke* zugewiesen, da es bei solchen Dreiecken wahrscheinlich ist, dass sie stark geschädigte Gebäudeteile darstellen.

Da bei der beschriebenen Flächensegmentierung ein neues Flächensegment nur dann entstehen kann, wenn ein Kristallisationsbereich gefunden wird, der eine vorgegebene Mindestgröße (z.B. 3x3 Pixel) hat und eine bestimmte Anfangsbedingung erfüllt, werden lange, schmale, ebene Flächen nicht erfasst. So kann es vorkommen, dass z.B. Vordächer oder Teile von Tonnendächern durch *Trümmendreiecke* repräsentiert werden (vgl. Abschnitt 4). Es wird daher eine erneute Flächensegmentierung durchgeführt, deren Ausgangspunkt die *Trümmendreiecke* bilden. Dabei wird ähnlich vorgegangen wie bei der Segmentierung auf der Basis von Rasterdaten. Der einzige Unterschied besteht darin, dass ausgehend von einem Startbereich (Startdreieck) statt der Nachbapixel die Punkte der benachbarten *Trümmendreiecke* betrachtet werden.

Nach Beendigung der Nachsegmentierung müssen die Dreiecke erneut klassifiziert werden. Dabei werden die neuen Klassen *Segmentdreiecke* und *Segment-Ebenen-Verbindungs-dreiecke* eingeführt. Bei den Dreiecken, welche die neu detektierten Flächensegmente bilden, handelt es sich um *Segmentdreiecke*. Dreiecke, die entweder neu entstandene Segmente oder neue und alte Segmente verbinden, werden der Klasse der *Segment-Ebenen-Verbindungs-dreiecke* zugeordnet.

4 Ergebnisse

Es ist von großem Vorteil, wenn im Zusammenhang mit Katastrophen „Pre-event“-Daten vorliegen. Das Testgebiet Karlsruhe wurde mit Laserscanning im Jahre 1997 und ein zweites Mal im Jahre 2002 befliegen. Weihnachten 1999 schlug der Sturm „Lothar“ eine Schneise der Verwüstung in Baden-Württemberg. In Abbildung 4 sind die Schäden visualisiert, die der Sturm Lothar im Zentrum von Karlsruhe angerichtet hat. Die Abbildung zeigt die Umgebung des Karlsruher Schlosses, den Schlosspark und das umliegende Waldgebiet, einen Teil der Universität und der Innenstadt. Als Ergebnis eines Vergleichs der beiden Laserscanning-Szenen werden Bäume, die durch den Sturm ent wurzelt wurden und umgefallen sind, in Rot dargestellt. Es können sehr deutlich einzelne Bäume entdeckt werden, die Opfer dieses Sturmereignisses wurden.

Change detection (z.B. Abbildung 4) ist eine der effizientesten Möglichkeiten für neue Medien und Systeme wie Laserscanning. Jedoch gibt es durch fortschrittliche Technologien noch sehr viele weitere Möglichkeiten. Eine ist die Überlagerung von CAD-Information aus dem

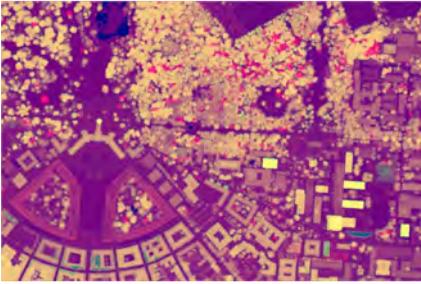


Abb. 4: Change detection nach einem Starksturmereignis. Umgestürzte Bäume sind rot markiert.



Abb. 5: AR nach einem Erdbebenereignis

Computer mit einem zerstörten Umfeld, wie in Abbildung 5 dargestellt. In diesem Beispiel ist das Bild eines vollkommen zerstörten Gebäudes überlagert mit einem CAD-Vektorplan einer unzerstörten Situation vor dem Erdbeben. Schnitte und virtuelle Shifts der Ruinen zeigen die Struktur des Gebäudes. Dies ist sehr hilfreich für Rettungsmaßnahmen. Tatsächlich kann die Information im Gelände und online gegeben werden, wobei die Abbildung der realen Szene sequentiell überlagert werden kann in Abhängigkeit von der Orientierung des Kopfes des Beobachters.

Ein weiteres Beispiel kommt aus dem Bereich der Hydrologie speziell im Zusammenhang mit Überschwemmungen. In Abbildung 6 wird eine Überlagerung von simulierten Wasseroberflächen mit der physikalischen Wirklichkeit gezeigt. Modelle der Hydrologie erlauben a priori die Bestimmung des Wasserspiegels als Funktion vieler Parameter. Zusammen mit einem digitalen Situationsmodell können beide Szenen überlagert werden. Es muss hier noch einmal unterstrichen werden, dass Abbildung 6 (links) in Echtzeit erfasst wurde - durch den Blick eines Beobachters im Gelände. Diese Methode kann erweitert werden, um Systeme zu unterstützen, welche mögliche Gefahren reduzieren sollen. In Abbildung 6 (Mitte) und (rechts) ist der Nutzen von mobilen Wänden dargestellt, welche vor dem Hochwasserereignis positioniert wurden. Die Lage der Wände ist in Abbildung 6 (Mitte) dargestellt; der simulierte Fall der Überschwemmung in Abbildung 6 (rechts). Die beiden Bilder entstammen Laserscanning-Daten. Dabei bedeutet „dunkel“ tieferes Gelände als die hellen Flächen. Abbildung 6 (rechts) zeigt sehr deutlich den simulierten Wasserspiegel und den Effekt der Schutzwände.

Obwohl die Beispiele, die für Überschwemmungen gegeben werden, simuliert sind – der Campus der Karlsruher Universität wird möglicherweise nie überschwemmt werden – so zeigen sie doch das Potenzial, das in der Kombination von AR und Laserscanning steckt. Es darf auch nicht unterschätzt werden, dass die Visualisierung von Schäden bei der Bevölkerung die Sensibilisierung für möglicherweise auf sie zukommende Schäden erhöht.

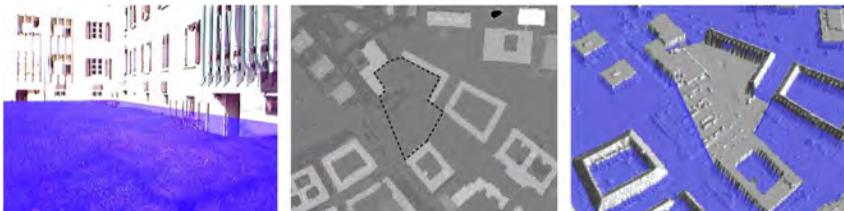


Abb. 6: AR bei simuliertem Hochwasserereignis (Campus Universität Karlsruhe) (COELHO, 2004)

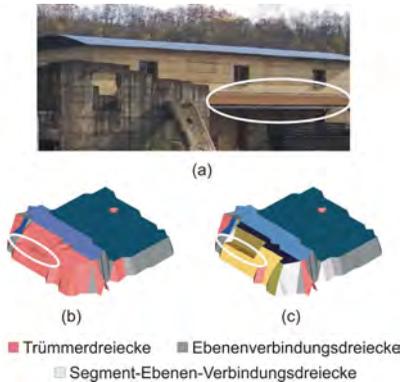


Abb. 7: Klassifiziertes TIN eines Gebäudes mit Vordach und Tonnendach (a) vor (b) und nach (c) der zweiten Flächensegmentierung. Jedes Segment ist in einer anderen Farbe dargestellt.

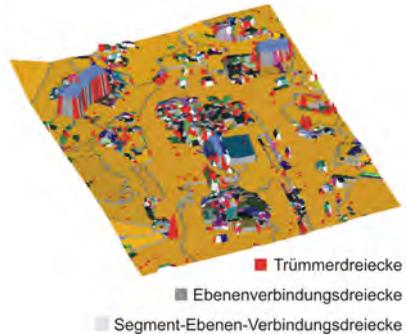


Abb. 8: Modell des Testgebiets mit geschädigten Gebäuden. Jedes Flächensegment ist in einer anderen Farbe dargestellt.

Das Verfahren zur Klassifizierung geschädigter Gebäude wurde anhand von Laserscannerdaten eines Gebiets mit real geschädigten Gebäuden getestet. Bei diesem Gebiet handelt es sich um das Übungsgelände der Schweizer Katastrophenhilfe. Es hat eine Größe von etwa 500 mal 800 Meter und wird für die Übung von Rettungs- und Bergungsmaßnahmen genutzt. Die Daten wurden im Jahr 2004 von der Firma TopoSys erfasst.

Abbildung 7 zeigt, wie das Modell eines Gebäudes (a) mit einem Vordach und einem Tonnendach vor (b) und nach (c) der erneuten Flächensegmentierung aussieht. Die *Trümmerdreiecke* sind darin in Rot, die *Ebenenverbindungsdreiecke* in Dunkel- und die *Segment-Ebenen-Verbindungsdreiecke* in Hellgrau dargestellt. Jedes der extrahierten Segmente ist in einer anderen Farbe visualisiert. Es ist zu erkennen, dass das Vordach sowie Teile des Tonnendachs bei der ersten Flächensegmentierung keinen Segmenten zugewiesen werden. Daher werden sie in dem TIN in Abbildung 7 (b) als Trümmer dargestellt. Nach der erneuten Flächensegmentierung gehören die entsprechenden Dreiecke neu entstandenen Flächensegmenten an.

Das CAD-Modell, das sich für das gesamte Testgebiet mit den geschädigten Gebäudestrukturen ergibt, ist in Abbildung 8 zu sehen. Dieses Beispiel soll zeigen, dass mit Hilfe eines solchen Modells die Möglichkeit besteht, Vermutungen darüber zu äußern, in welchen Bereichen mit einer hohen Wahrscheinlichkeit starke Schädigungen vorliegen und in welchen die Gebäude vermutlich nur unwesentlich beschädigt sind. Dabei ist allerdings zu beachten, dass auf diese Weise nicht alle Schadenstypen erkannt werden können. Um Schädigungen wie den „Pancake-Collapse“ in der Bildmitte zu detektieren, wäre der Vergleich mit einem „Pre-event“-Modell nötig.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Hochpräzise Navigation, Laserscanning und AR umschreiben die Hardwarekomponenten für ein effektives Katastrophenmanagementsystem. Daneben bestehen hohe Anforderungen an die damit verbundene Datenverarbeitung. Am Beispiel der Segmentierung und Klassifizierung von zerstörten Gebäuden sollte dies deutlich werden.

Die Entwicklung technischer Systeme, sowohl Hardware als auch Software betreffend, zeigt allerdings nur eine Seite der notwendigen Entwicklung. Der Betrieb eines Systems, insbesondere sein Einsatz im realen Katastrophenfall, erscheint dagegen noch eine Dimension komplexer. Gerade in von Katastrophen häufig betroffenen Gebieten, z.B. in Ländern der Dritten Welt, kann nicht davon ausgegangen werden, dass heute bereits solche Systeme verfügbar sind und dies dazu noch kurzfristig. Nicht ohne Grund ist bei uns das Netz von Feuerwehr und technischem Hilfswerk sehr engmaschig. Selbst in dem Augenblick, wo es technisch machbar wird, ist der Schritt zum Einsatz moderner, weitgehend autonom und automatisch arbeitender Systeme zur Unterstützung von Katastrophenmanagement noch lange nicht getan.

6 Dank

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (SFB 461) für die finanzielle Unterstützung sowie der Schweizer Katastrophenhilfe für die Bereitstellung ihres Geländes.

7 Literaturverzeichnis

- AZUMA, R., BAILLOT, Y., BEHRINGER, R., FEINER, S., JULIER, S. UND MACINTYRE, B., 2001: Recent Advances in Augmented Reality. In: IEEE Computer Graphics and Application, Bd. 25 (6), S. 24-35.
- BAARDA, W., 1968: A testing procedure for use in geodetic networks. Publications on geodesy 2(5), Netherlands Geodetic Commission.
- BÄHR, H.-P., VÖGTLE, T. (HRSG.), 2005: Digitale Bildverarbeitung. Anwendungen in Photogrammetrie, Fernerkundung und GIS. 4. völlig neu bearbeitete Auflage, Herber Wichmann Verlag Heidelberg.
- COELHO, A. H., 2004: Augmented Reality zur Visualisierung simulierter Hochwasserereignisse. Dissertationsschrift, Universität Karlsruhe, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften.
- GEHBAUER, F., MARKUS, M., FIEDRICH, F., GENTES, S., SCHWEIER, C., 2003: Forschungsarbeiten zur technischen und organisatorischen Bewältigung von Katastrophen mit Gebäudeschäden. Bauingenieur, Vol. 78, Juli/August 2003, S. 369-378.
- HECK, B., 1985: Ein- und zweidimensionale Ausreißertests bei der ebenen Helmert-Transformation. Zeitschrift für Vermessungswesen 110(10), S. 461-471.
- LEEBMANN, J., 2005: Dreidimensionale Skizzen in der physikalischen Welt. Dissertationsschrift, Universität Karlsruhe, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften/Universität Louis Pasteur Strasbourg.
- LEEBMANN, J., COELHO, A. H., BÄHR, H.-P., STAUB, G., WIESEL, J., 2004: Augmented Reality im Katastrophenmanagement. In: A. Zipf (Ed) 3D-Geoinformationssysteme – Grundlagen und Anwendungen, Wichmann-Verlag Heidelberg, ISBN 2879074119.
- NIEMEIER, W., 2002: Ausgleichsrechnung, Walter de Gruyter, Berlin.
- STAUB, G., 2006: Navigation mit mobilen Augmented Reality Systemen im Gelände. Dissertationsschrift, Universität Karlsruhe, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften.
- STEINLE, E., BÄHR, H.-P., 1999: Laserscanning for change detection in urban environment. In: Altan/Gründig (eds.), Proceedings of the Third Turkish-German Joint Geodetic Days – Towards A Digital Age, Volume I, Istanbul, Turkey, S. 147-156.
- STEINLE, E., 2005: Gebäudemodellierung und -änderungserkennung aus multitemporalen Laserscanningdaten. Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 594, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München.

Stabilität von Regionen im Skalenraum

MARTIN DRAUSCHKE¹, HANNS-FLORIAN SCHUSTER¹ & WOLFGANG FÖRSTNER¹

Zusammenfassung: Für die automatische Erfassung von Gebäuden aus Luftbildern ist es nützlich, Bildstrukturen im Skalenraum, d. h. über mehrere Auflösungsstufen zu beobachten, um für die Objekterkennung hinderliche Details ausblenden zu können. Große Bedeutung messen wir dabei den homogenen Regionen sowie deren Nachbarschaften zu.

Regionen betrachten wir als stabil, wenn sie über einen mehrere Skalenstufen invariant bleiben. Sie haben spezielle Eigenschaften: Beim Vergrößern der Skala verschmelzen benachbarte Regionen, wobei eine Region immer vollständig in der anderen aufgeht. Zudem zerteilen sich stabile Regionen nicht, wenn die Skala steigt. Diese speziellen Eigenschaften erleichtern das Bestimmen der Nachbarschaften in einer vorgegebenen Skala, denn der Regionennachbarschaftsgraph (RNG) muss nur einmal auf der untersten Ebene des Skalenraums berechnet werden. Die RNGs in den anderen Ebenen können leicht aus der untersten Ebene berechnet werden.

1 Einleitung

Gebäude und Gebäudeteile stellen wegen ihrer großen Variabilität in Form und Ansicht eine große Herausforderung für die automatische Erfassung aus Luftbildern dar. Für das Erkennen von komplexeren Strukturen, die sich z.B. im Vorhandensein von Dachgauben, Erkern oder Anbauten zeigen, wollen wir einen generischen Ansatz entwickeln. Dafür benötigen wir aus dem Bild extrahierte Merkmale sowie ihre topologischen Beziehungen untereinander.

In Luftbildern sind von Gebäuden vor allem Dachflächen sichtbar. Diese weisen nur eine schwache Textur auf, weil Dächer in der Regel gleichmäßig abgedeckt werden. Eine Differenzierung der Dachdeckung ist zudem durch die zu grobe Bodenauflösung von Luftbildern (5 bis 30 cm) kaum möglich. Bilder unterschiedlicher Auflösung zeigen Objekte verschiedener Skala. Viele kleine Dachaufbauten wie Antennen und Schornsteine sind für die maschinelle Gebäudeerkennung hinderlich. Auf einer niedrigeren Auflösungsstufe sind diese für die Problemstellung entbehrlichen kleinskaligen Gebäudeteile häufig nicht mehr erkennbar, dagegen sind die Kanten zwischen großskaligen Objekten wie planaren Dachflächen oftmals auch bei niedrigerer Auflösung noch detektierbar. Aus diesem Grund untersuchen wir, inwieweit sich die Analyse der Veränderung von Bildstrukturen im Skalenraum für die Gebäudeerfassung eignet.

Wir wollen die Stabilität der detektierten Merkmale im Skalenraum untersuchen. Als Stabilitätskriterium verwenden wir Position und Ausdehnung von Regionen, sie sollen sich über größere Skalenbereiche nur geringfügig ändern. Damit ist unser Ansatz dem von MATAS et al. (2002) ähnlich, der Regionen als stabil betrachtet, die sich über mehrere Intensitätsniveaus nicht ändern.

Die Merkmalsextraktion im Skalenraum ist ein intensiv untersuchtes Gebiet. Eine gute Einführung gibt LINDBERG (1994). Für die Detektion von Regionen verwendet er einen normierten Laplace-Filter. Kanten werden durch die Vorzeichenwechsel der zweiten Ableitun-

¹ Martin Drauschke, Hanns-Florian Schuster und Prof. Dr. Wolfgang Förstner, Institut für Photogrammetrie, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Nussallee 15, 53115 Bonn, e-mail: martin.drauschke@uni-bonn.de, schuster@ipb.uni-bonn.de bzw. wf@ipb.uni-bonn.de

gen erfasst. Die Lage dieser Merkmale ist uns jedoch über den Skalenraum zu instabil. Skaleninvariante Punktdetektoren, wie z. B. der von LOWE (2004) vorgestellte Operator, sind für die Gebäudeerfassung aus Luftbildern wegen der schwachen Texturierung der Objektflächen ebenfalls nur bedingt einsetzbar.

Wir wollen untersuchen, ob sich extrahierten Merkmale künstlicher Objekte wie Gebäude, Autos oder Straßen in Bezug auf ihre Stabilität im Skalenraum von den Merkmalen der natürlichen Objekten wie Wiesen und Bäume unterscheiden. Zudem haben künstliche Objekte im Allgemeinen eine einfach beschreibbare geometrische Form.

Die Fläche von Regionen ist deutlich stabiler ihr Rand. Aus diesem Grund kann man erwarten, dass im Skalenraum Regionen stabiler sind als Kanten.

Dieser Artikel ist wie folgt gegliedert. Die Wahl des Skalenraums und die geeigneten Verfahren für die Bildsegmentierung diskutieren wir im folgenden Kapitel. Auf die Stabilität der Regionen gehen wir im dritten Kapitel ein. Da sich für diese Regionen die skalenübergreifende Nachbarschaftsbestimmung stark vereinfacht, thematisieren wir diesen Sachverhalt in Kapitel 4.

2 Methodische Ansätze: Skalenraum und Bildsegmentierung

Ein mehrkanaliges Bild g ist ein c -Vektor, d. h. bei Farbbildern ein 3-Vektor, von einkanaligen Bildfunktionen g_c mit

$$g_c : R^2 \rightarrow F, \quad g_c(x,y) = \text{farbwert}.$$

Betrachtet man ein Bild im Skalenraum, dann wird der Definitionsbereich dieser Bildfunktionen um einen dritten, nicht negativen Wert, die Skala σ , erweitert:

$$g_c : R^2 \times R^+ \rightarrow F, \quad g_c(x,y;\sigma) = \text{farbwert}.$$

Die Ebene $g_c(x,y;0)$ enthält das Originalsignal eines Bildkanals, entsprechend wird das transformierte Bild in Skala σ als Layer im „Bildraum“ dargestellt (siehe Abb. 1, das untere Layer zeigt das Originalbild, das obere Layer zeigt das im Gauß'schen Skalenraum transformierte Bild bei $\sigma = 8$).

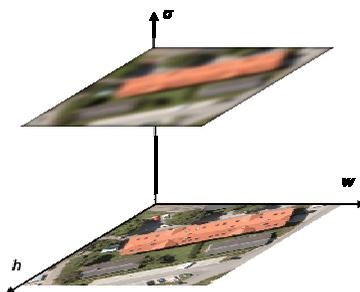


Abb. 1: Bild-Layer im Skalenraum

Für unsere Anwendung haben wir zwei verschiedene theoretische Ansätze des Skalenraums in Betracht gezogen und genauer untersucht: den Gauß'schen sowie den Morphologischen Skalenraum.

2.1 Gauß'scher Skalenraum

Der Gauß'sche Skalenraum wird seit KOENDERINK (1984) in der Literatur ausgiebig diskutiert. Er zeigte, dass die Transformation im Skalenraum die Wärmeleitungsgleichung

$$\partial_\sigma L = \frac{1}{2} \nabla^2 L$$

erfüllen muss, damit willkürliche Veränderungen des Bildsignals wie das Auftreten neuer Bildstrukturen bei einer größeren Auflösung unterbunden werden. Die Lösung dieser Differentialgleichung wird durch die Faltung des Bildsignals mit dem Gaußfilter beschrieben:

$$g_c(x, y; \sigma) = g_c(x, y) * \frac{1}{2\pi\sigma} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma}}$$

Bei digitalen Bildern wird diese Faltung approximiert. Auf diese Weise wird ebenfalls die Gauß'sche Bildpyramide berechnet (CROWLEY et al., 2002). Zwischen den Pyramidenstufen λ und der Skala $\sigma > 0$ besteht folgender Zusammenhang: $\sigma = 2^{\lambda-1}$.

Die Layer des diskreten Skalenraums haben wir gleichmäßig verteilt, d.h. zwischen den Pyramidenstufen $\lambda = 1$ und 2 sowie zwischen 2 und 3 gibt es gleich viele Layer. Sind $\sigma_0 = 1$ und σ_N die größte Skala des von uns betrachteten Skalenraums sowie n die Anzahl der Bild-Layer zwischen zwei Pyramidenstufen entsprechenden Skalen, dann wird der Skalenraum durch die Skalen $\sigma = 2^{i/n} \sigma_0$, $i = 0, \dots, N$ dargestellt. Die Skalen zwischen den Pyramidenstufen 0 und 1 können durch negative Exponenten i berechnet werden.

2.2 Morphologischer Skalenraum

Die Glättung des Bildes mit einem großen Gaußfilter $G_\sigma(x, y)$ hat starke Auswirkungen auf die Segmentierung. Durch Manipulation des Bildes mit morphologischen Filtern

$$g_c(x, y; \sigma) = g_c(x, y) * M^\sigma(x, y)$$

bleiben die Konturen großer Bildstrukturen eher bestehen. Deshalb bildet der von BANGHAM (1996) vorgestellte Morphologische Skalenraum eine Alternative zum Gauß'schen Skalenraum.

Im Morphologischen Skalenraum wird die Skala nicht mehr über die Gauß-Funktion definiert. Stattdessen kennzeichnet σ nun die Größe, z. B. den Durchmesser des bei den morphologischen Operationen verwendeten Strukturelements, etwa eines Kreise oder eines Quadrats. Mit $\psi_\sigma(g_c(x, y))$ wird ein Opening und mit $\gamma_\sigma(g_c(x, y))$ ein Closing notiert. Die morphologischen Skalenraum-Filter sind Kompositionen dieser beiden Operationen, sie sind wie folgt definiert:

$$M^\sigma = \gamma_\sigma \psi_\sigma, \quad N^\sigma = \psi_\sigma \gamma_\sigma.$$

Die Abbildungen 2(a-c) zeigen die Transformation eines Bildes im morphologischen Skalenraum. Links ist das Originalbild zu sehen, daneben das Bild in Skala 3 bzw. in Skala 10. Bei kleinen Skalen (wie Abb. 2b) sind die Bildstrukturen noch deutlich erkennbar, kleine Details verschwinden. Bei großen Skalen dagegen sind die Konturen der im Bild dargestellten Objekte nur bei großen Kontrasten noch vorhanden. Zudem werden die Bildstrukturen durch die Form des Strukturelements verändert.

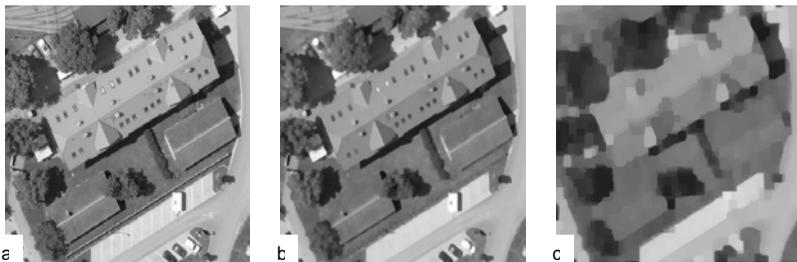


Abb. 2: Transformation im Morphologischen Skalenraum mit M^σ -Filter (v.l.n.r. $\sigma = 0, 3$ bzw. 10).

Somit lässt sich feststellen, dass der Morphologische Skalenraum nur mit kleinen Strukturelementen, also in kleinen Skalen verwendet werden sollte. Zudem lassen sich keine Zwischenstufen wegen der Atomarität der Pixel des Strukturelements definieren. Für unsere Untersuchung kommt er somit nicht mehr in Betracht, ein Segmentierungsergebnis wird dennoch in Abbildung 5 präsentiert.

2.3 Bildsegmentierung

In der Einleitung haben wir bereits die Merkmalsextraktion diskutiert. Punktoperatoren sind wegen der schwachen Textur der von uns betrachteten Objekte nur bedingt einsetzbar. Wir benötigen Regionen und ihre Nachbarschaften für die Erfassung von Dachflächen.

Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten für die Detektion von Regionen. LINDBERG (1994) charakterisiert Blobs über normalisierte Laplace-Filter und detektiert somit den Rand dieser Regionen. FÖRSTNER (1994) prüft mit einem Schwellwertverfahren auf Homogenität in der Umgebung von Pixeln und erfasst somit Regionen als homogener Bereiche. Die auf diese Weise erfassten Regionen haben sehr komplizierte Ränder und eignen sich nicht sehr gut zum Erkennen von Bildstrukturen.

Neben den Regionen werden auch die Regionennachbarschaften für die Interpretation der Bildstrukturen benötigt. Bei den eben vorgestellten Operatoren können die Nachbarschaften zwischen den Regionen beispielsweise durch ein Voronoi-Diagramm berechnet werden.

Bei Segmentierungsalgorithmen, die eine vollständige Partition des Bildes erzeugen, können diese Nachbarschaften direkt aus der generierten Merkmalskarte abgelesen werden. Zwei solche Ansätze haben wir für unser Problem untersucht, das Multiple Thresholding nach Gonzalez et al. (zitiert in OLSEN, 1996) sowie die Segmentierung mit Wasserscheiden nach VINCENT et al. (1991).

Das Multiple Thresholding wird für jeden Bildkanal ausgeführt. Nach Analyse des Histogramms erfolgt eine Quantisierung des Bildes, indem jedem Farbintervall ein einheitlicher Farbwert zugewiesen wird. Auf diese Weise werden benachbarte Pixel mit ähnlichen Farbwerten gruppiert und zu Region miteinander verbunden.

Die Intervallgrenzen werden durch die dem Verfahren gebenden Schwellwerte bestimmt. Wir haben dazu die lokalen Minima des Histogramms verwendet. Die Ergebnisse dieses Segmentierungsverfahren hängen stark von der Größe der Umgebung ab, in denen die Minimalstellen gesucht werden.



Abb. 3: Farb-Segmentierung des Bildes mit Multiple Thresholding

Die Abbildungen 3(a-c) zeigen die Veränderungen des Bildes durch Anwendung des Multiple Thresholding. Die lokalen Minimalstellen wurden links in einer Umgebung von 9 Farbwerten gesucht, in der Mitte in einer Umgebung von 21 und rechts von 39.

Kleine Umgebungen führen demzufolge zu Partitionen mit sehr kleinen Farbreionen (siehe Abb. 3a), bei großen Umgebungen verstärken sich die Kontraste Bild, was wegen der Schatten hinderlich für die Gebäudeerkennung bei schlechten Beleuchtungsverhältnissen ist.

Das andere von uns untersuchte Verfahren für die Bildsegmentierung nach VINCENT et al. (1991) verwendet Wasserscheiden auf dem Quadratischen-Gradienten-Bild. Die Funktionsweise des Wasserscheidenalgorithmus kann man sehr gut mit sich füllenden Wasserbecken veranschaulichen. Für jeden Bildkanal wird der quadratische Gradient

$$\|\nabla g_c(x, y; \sigma)\|^2$$

berechnet. Diese Werte werden als Gebirge interpretiert, von den Tälern aus wachsen die Regionen. Die Grenzen der Regionen sind durch die „Gebirgskämme“ festgelegt, wo die Regionen aneinander stoßen. Weitere Veranschaulichungen des Algorithmus findet man bei OLSEN (1996, Seite 37ff.). Ferner zeigt die Abbildung 4 einen Querschnitt durch ein Gradientenbild mit den Grenzen der Regionen.

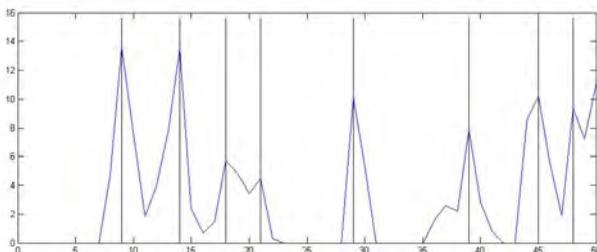


Abb. 4: Wasserscheiden im manipulierten Gradientenbild

Für die Segmentierung muss das unterschiedliche Rauschverhalten der einzelnen Bildkanäle berücksichtigt werden. Aus diesem Grund gewichten wir die quadratischen Gradienten mit dem Reziproken der geschätzten Varianz des Rauschens n_c und erhalten somit als „Gradientengebirgsfunktion“ h :

$$h(x, y; \sigma) = \sqrt{\sum_{c=1}^3 \frac{\|\nabla g_c(x, y; \sigma)\|^2}{\text{var}(n_c)}} .$$

Für diese Abschätzung der Rauschvarianz verwenden wir eine robuste Schätzung mit Hilfe des Median (vgl. BRÜGELMANN et al. (1992):

$$\text{var}(n_c) = \max \{1, \text{med} (\|\nabla g_c(x, y; \sigma)\|^2 / (1 - \ln 2))\} .$$

Eine zusätzliche Rauschunterdrückung erschwert eine Übersegmentierung des Bildes, zu der der Wasserscheidenalgorithmus sehr häufig neigt. Durch folgende Transformation des gewichteten Quadratischen-Gradienten-Bilds erhalten wir unsere Eingabefunktion h' , wie sie in Abbildung 4 bereits dargestellt wird und mit der wir die Wasserscheiden bestimmen:

$$h'(x, y; \sigma) = \max \{0, h(x, y; \sigma) - k \cdot \text{var}(n_c)\} .$$

Wir verwenden in den folgenden Untersuchungen $k = 0.3$. Die Abbildung 5(a) zeigt das Originalbild und die Abbildungen 5(b,c) zeigen die jeweilige Bildsegmentierung mit dem Wasserscheidenalgorithmus für ein Bild im Skalenraum. In der Mitte wurde der Gauß'sche Skalenraum, rechts der Morphologische Skalenraum mit einem Quadrat als Strukturelement ver-

wendet. In beiden Fällen wurde ein 7×7 -Filter verwendet, so dass sich um die jeweiligen Skalen $\sigma_{gauss}=1.1329$ und $\sigma_{morph}=7$ handelt.

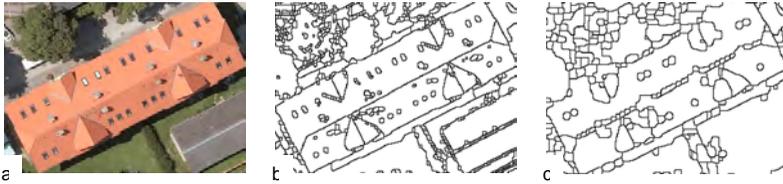


Abb. 5: Wasserscheidensegmentierung im Skalenraum

Durch diese Gegenüberstellung wird noch einmal deutlich, dass der Morphologische Skalenraum für unsere Untersuchung inakzeptabel ist. Die geometrische Form der Dachgauben im segmentierten Bild wird durch das Strukturelement stark verändert, zudem gibt es deutlich größere Probleme beim Übergang zwischen dem Haus und seiner Umgebung.

3 Stabilität und Unsicherheit von Regionen

Die Ausgabe des Wasserscheidenalgorithmus ist ein gelabeltes Bild, das wir mit $l(x,y;\sigma)$ bezeichnen. Pixel mit gleichem Label, l , bilden die Region $R(l,\sigma)$. Für eine feste Skala σ gilt: Die Vereinigung aller Regionen $\bigcup_l R(l,\sigma)$ ergibt das gesamte Bild sowie zwei Regionen schneiden sich nicht: $R(l,\sigma) \cap R(l',\sigma), l \neq l'$.

Die Zuordnung von Regionen über mehrere Skalen ist dagegen nur sinnvoll, wenn sich diese nur in wenigen Pixeln unterscheiden. Analog zu MSER-Verfahren von MATAS et al. (2002) lösen wir das Zuordnungsproblem über die Stabilität von Regionen.

Eine Region $R(l,\sigma_i)$ ist im Intervall $[\sigma_1,\sigma_2]$ genau dann stabil, wenn für einen Schwellwert t gilt:

$$\forall \sigma_1, \sigma_j \in [\sigma_1, \sigma_2]: |[R(l,\sigma_i) \setminus R(l,\sigma_j)] \cup [R(l,\sigma_j) \setminus R(l,\sigma_i)]| \leq t$$

Die vom Wasserscheidenalgorithmus detektierten Regionen verändern ihre Lage während der Transformation im Gauß'schen Skalenraum, allerdings sind diese Veränderungen erst bei größeren Skalenunterschieden gravierend. Aus diesem Grund kann die Veränderung der Region pro Pixel zwischen zwei dicht aufeinander folgenden Skalenstufen durch die Veränderung in der Fläche gemessen werden.

Durch die Glättung im Gauß'schen Skalenraum werden auch die Beträge des Quadratischen Gradienten-Bilds einander angeglichen, entsprechend verschmelzen die vom Wasserscheidenalgorithmus detektierten Regionen miteinander. Wenn sich zwei Regionen mit einer genügend großen Fläche vereinen, gibt es einen gravierenden Unterschied in der Fläche. Diese Events im Skalenraum bestimmen den Anfang bzw. das Ende von stabilen Regionen.

Die Grenzen der Regionen schwanken ein wenig, was durch den Wasserscheidenalgorithmus bedingt wird. Aus diesem Grund wollen wir auch die Unsicherheit der Flächeninhalte der Regionen diskutieren. Sie hat direkte Auswirkung auf die Beurteilung der Stabilität.

Wir können eine Region auch als Polygon mit n Stützpunkten p_j darstellen, das die Kantenlängen d_j zwischen zwei aufeinander folgenden Punkten hat. Zudem nehmen wir an, dass alle Punkte dieselbe Unsicherheit von $\sigma_p = 0.5$ [Pixel] haben. Dann wird die Unsicherheit der Fläche σ_A einer Region durch folgende Formel berechnet:

$$\sigma_A^2 = \frac{1}{4} \sum_j d_j^2 \sigma_p^2.$$

Bei dichten Punkten und einer glatten Kontur der Region, d.h. $n \rightarrow \infty$, ergibt sich für die Standardabweichung der Fläche: $\sigma_A = \frac{1}{\sqrt{4n}} \sigma_p$, d.h. sie hängt ausschließlich vom Umfang der Region ab.

Der Flächeninhalt wird für jede Region mit einem $3 \sigma_A$ -breiten Fehlerband versehen, wodurch die Unsicherheit der Fläche ausgedrückt wird. Dieses Fehlerband bewirkt einen größeren Toleranzbereich für das Stabilitätskriterium bzw. einen größeren Schwellwert t .

Die Abbildung 6 zeigt drei Regionen um einen manuell ausgesuchten Bildpunkt (v.l.n.r. in den Skalen $\sigma = 1, 4$ und 8) sowie die Entwicklung des Flächeninhalts. Waagrecht verlaufende Fehlerbänder markieren eine stabile Region, die starken Sprünge im Diagramm kennzeichnen die Events im Skalenraum, wo zwei Regionen miteinander verschmelzen.

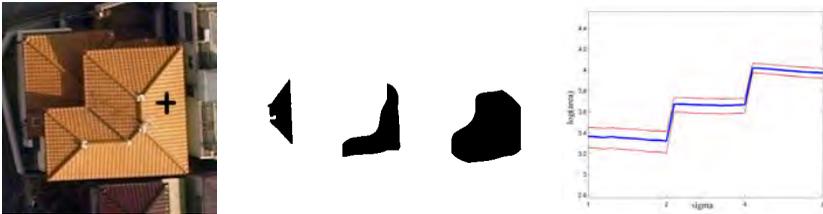


Abb. 6: Beispiel für Entwicklung des Flächeninhalts von Regionen im Skalenraum

4 Nachbarschaftsbestimmung der stabilen Regionen

Stabile Regionen haben im Skalenraum spezielle Eigenschaften, die mit der Implementierung des Wasserscheidenalgorithmus erklärt werden können. Bei kleinen, instabilen Regionen haben Rundungen erkennbare Auswirkungen auf Erscheinung und Form der Regionen. Bei stabilen Regionen gilt dagegen: Beim Verschmelzen benachbarter, stabiler Regionen geht immer eine Region vollständig in der anderen auf. Anderenfalls gäbe es eine Wasserscheide, die sich erst in höheren Skalen bemerkbar macht, d.h. der quadratische Gradient schrumpft bei zunehmender Glättung umgekehrt proportional zu seiner Größe. Das ist aber nicht der Fall.

Für den generischen Ansatz zur Gebäudeerkennung benötigen wir auch die Nachbarschaften der stabilen Regionen. Dazu interpretieren wir alle Regionen als Hintergrund, die im gesamten Skalenraum instabil bleiben. Eine Nachbarschaftsbestimmung zuzüglich dieser instabilen Regionen ist nicht erforderlich, zudem werden so die Berechnungen beschleunigt.

Auf diese Weise muss der Regionennachbarschaftsgraph (RNG) nur einmal auf der untersten Ebene des Skalenraums berechnet werden. Die RNGs in den anderen Ebenen können leicht aus der untersten Ebene berechnet werden, weil die Nachbarschaftsverhältnisse beim Verschmelzen von zwei Regionen übertragen werden.

5 Literaturverzeichnis

- BANGHAM, J.A., HARVEY, R., LING, P.D., AND R.V. ALDRIDGE, 1996: Morphological scale-space preserving transforms in many dimensions. *Journal of Electronic Imaging* 5 (3), S. 283-299.
- BRÜGELMANN, R., AND W. FÖRSTNER, 1992: Noise Estimation for Color Edge Extraction. - Förstner/Ruwiedel (Ed.): *Robust Computer Vision*, Wichmann, Karlsruhe, S. 90-106.
- CROWLEY, J.L., RIFF, O., AND J.H. PIATER, 2002: Fast Computation of Characteristic Scale Using a Half-Octave Pyramid. *CogVis 2002, International Workshop on Cognitive Computing*, Zürich.
- FÖRSTNER, W., 1994: A Framework for Low Level Feature Extraction. LNCS 802, Springer, S. 383-394.
- KOENDERINK, J., 1984: The Structure of Images. - *Biological Cybernetic* 50, S. 363-370.
- LINDBERG, T., 1994: Scale-Space in Computer Vision, 423 S., Kluwer, Dordrecht.
- LOWE, D.G., 2004: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. - *International Journal of Computer Vision* 60 (2), S. 91-110.
- MATAS, J., CHUM, O., URBAN, M. AND T. PAJDLA, 2002: Robust Wide Baseline Stereo from Maximally Stable Extremal Regions. - *Image and Vision Computing* 22 (10), S. 761-767.
- OLSEN, O.F., 1996: Multi-Scale Segmentation of Grey-Scale Images, Master Thesis, University of Copenhagen, 89 S.
- VINCENT, L., AND P. SOILLE, 1991: Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 13 (6), S. 583-598.

Bestimmung der Klassifikationsgüte für räumlich hoch auflösende Fernerkundungsszenen

MONIKA GÄHLER¹ & JOCHEN SCHIEWE²

Zusammenfassung: Die Bestimmung der thematischen Klassifikationsgüte stellt eine Standardaufgabe zur Qualitätsbeurteilung der eingesetzten Fernerkundungsszenen sowie des Klassifikationsverfahrens dar. Hierfür kommen in der Regel empirische Methoden zum Einsatz, die Maße wie Gesamtklassifikationsgenauigkeit oder Kappa-Koeffizient ableiten. In diesem Artikel werden Probleme bei der empirischen Bestimmung der Klassifikationsgüte aufgezeigt, die durch die Nutzung höchst auflösender Fernerkundungsdaten (Bodenpixelgröße < 1 m) noch verstärkt werden. Anhand eines Beispiels (Biotoptypenklassifikation auf Basis von HRSC-AX-Daten) werden Schwierigkeiten und Lösungsansätze demonstriert. Hierbei präsentieren wir ein neues Maß, das Fuzzy Certainty Measure (FCM), das die unsicheren Grenzen in den Referenzdaten sowie räumlich-thematische Unschärfen in der Landschaftsbeschreibung berücksichtigt.

1 Motivation

Um Aussagen zur thematischen Genauigkeit und Zuverlässigkeit der mittels Bildklassifikation erzeugten Daten und kartographischen Darstellungen treffen zu können, ist eine Bestimmung und Bewertung der Klassifikationsgüte notwendig. Eine Ergebnisevaluierung ist insbesondere unabdingbar, wenn klassifizierte Daten als Planungsgrundlage dienen und/oder das Potenzial (neuer) Fernerkundungssensoren für thematische oder topographische Kartierzwecke bewertet werden sollen.

Für diese Zwecke werden in der Regel standardisierte, empirische Verfahren verwendet, die entweder einzelne Kennwerte (wie z.B. Gesamt-, Hersteller- und Nutzergenauigkeit oder Kappa-Koeffizient) bzw. eine Fehlermatrix berechnen, indem die Übereinstimmung von Referenzdaten mit den klassifizierten Daten verglichen wird (vgl. z.B. CONGALTON 1991). Für die Anwendung der konventionellen, statistisch begründeten Verfahren liegen eine Reihe von (vergleichenden) Veröffentlichungen mit Anwendungsbeispielen vor (siehe z.B. FOODY 2004, THOMAS et al. 2003).

Bei der quantitativen Bestimmung der Klassifikationsgüte sind jedoch Probleme evident, die bei der Nutzung höchst auflösender Fernerkundungsdaten (z.B. der neuen Generation von digitalen Luftbild- oder Satellitensensoren) noch verstärkt werden. Diese Probleme werden im folgenden Abschnitt aufgezeigt und an einem HRSC-AX-Datensatz demonstriert, der für einen Ausschnitt des Naturschutzgebietes Heuckenlock (südlich von Hamburg) hinsichtlich Biotoptypen am Institut für Geoinformatik und Fernerkundung (IGF) klassifiziert wurde. In Abschnitt 3 wird eine alternative Bewertungsmethode präsentiert, die auf einem fuzzy logic-Ansatz beruht und für einige der skizzierten Probleme Abhilfe schaffen kann.

¹ Dipl.-Geogr. Monika Gähler, Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, Universität Osnabrück, Seminarstr. 19a/b, 49069 Osnabrück, e-mail: mgaehler@iqf.uni-osnabrueck.de

² apl. Prof. Dr.-Ing. Jochen Schiewe, Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, Universität Osnabrück, Seminarstr. 19a/b, 49069 Osnabrück, e-mail: jschiewe@iqf.uni-osnabrueck.de

2 Probleme bei höchst auflösenden Fernerkundungsszenen

2.1 Unsicherheiten in den Referenzdaten

Die Kennwerte zur Beschreibung der Klassifizierungsgüte basieren in der Regel auf Fehlermatrizen, in denen die Referenzdaten mit den klassifizierten Daten verglichen werden. Dabei wird von der Annahme ausgegangen, dass Fehler ausschließlich in den klassifizierten Daten vorliegen. In der Realität treten aber auch Unsicherheiten in den Referenzdaten auf, wie z.B. durch fehlerhafte Lagebestimmung, fehlende Aktualität, Generalisierung bei der Abgrenzung sowie einen zu kleinen Erhebungsmaßstab im Verhältnis zu den Fernerkundungsdaten. Gerade für höchst auflösende bzw. großmaßstäbliche Anwendungen ist es grundsätzlich schwierig, geeignete, hoch genaue Referenzdaten zu akquirieren.

Abb. 1 demonstriert exemplarisch die Lagedifferenzen, die aus der Imperfektion sowie aus den verschiedenen Erfassungszeitpunkten der Referenzdaten resultieren. So stellt die aus einer manuellen Digitalisierung abgeleitete Vergleichsgrundlage aufgrund typischer Generalisierungsprozesse und der fehlenden Aktualität (1992) keine exakte Referenz dar. Die Klassifikation der höchst auflösenden Bilddaten (Bildaufnahme 2002) ermöglicht auch die Abgrenzung kleinster Objekte (z.B. Einzelbäume), die in der Referenz aufgrund des kleineren Erfassungsmaßstabes sowie der manuellen Abgrenzung nicht digitalisiert wurden.

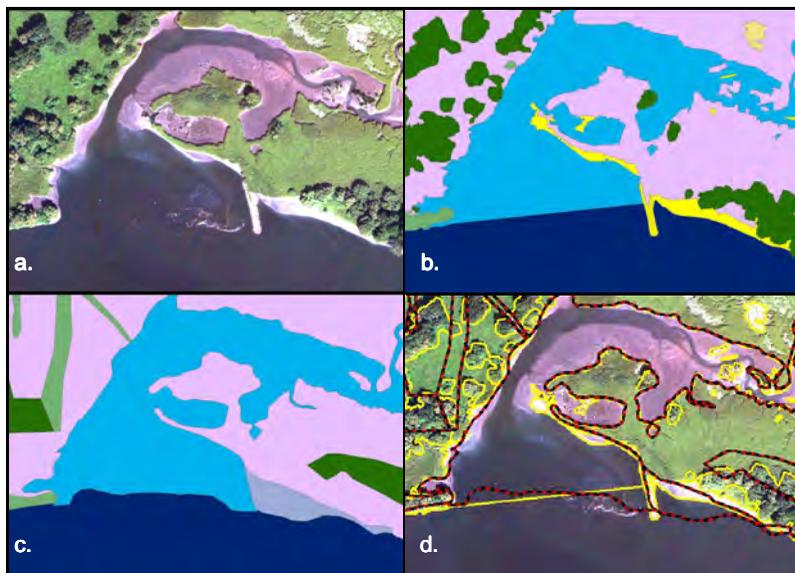


Abb. 1: Problem der unsicheren Referenz (Beispiel Ausschnitt Heuckenlock)
a. HRSC-AX-Bild (Ausschnitt ca. 450 m x 320 m);
b. detailliertes Ergebnis der Klassifizierung 2002;
c. aus Feldbegehung abgeleitete Referenz 1992;
d. Überlagerung der Grenzen der klassifizierten Regionen (gelb) sowie der Referenzregionen (schwarz-rot gestrichelt) zum Vergleich

2.2 Unbestimmte Grenzen

Die Regeln zur Zuordnung eines Bildobjekts zu einer vorgegebenen Klasse gehen in aller Regel von diskreten Grenzen zwischen den Objekten aus. In der Praxis lassen sich Grenzen zwischen topographischen Objekten jedoch nicht immer scharf ziehen. Hierfür sind neben Messungenauigkeiten insbesondere thematische Unschärfen verantwortlich, die sich bereits bei der Definition von Klassen ergeben (z.B. bei der Beschreibung des Übergangs von Wald zu Röhricht). Aufgrund dieser unbestimmten Grenzen ist auch der klassische, diskrete Ansatz zur Bestimmung der Klassifikationsgüte streng genommen nicht korrekt.

In höchst auflösenden Fernerkundungsdaten steigt nun die Anzahl von abgrenzbaren Bildobjekten – und damit auch die Anzahl unbestimmter Grenzen – deutlich an, da nunmehr auch Einzelelemente spektral unterscheidbar sind (wie z.B. Offenboden bzw. Lichtungen in Waldbeständen; siehe Abb. 2). Des Weiteren entsteht in höchst auflösenden Daten eine höhere Anzahl von Pixeln, die unscharfe Übergangsbereiche zwischen Klassen repräsentieren, wie z.B. in Abb. 1 Röhricht und Wald. Hierdurch wird eine eindeutige Zuordnung bei der Interpretation unmöglich bzw. stark subjektiv. Die nahe liegende Einführung zusätzlicher (Misch-)Klassen löst nach Wang (1990) das Unschärfeproblem nicht grundsätzlich, da nicht nur ein größerer Prozessierungsaufwand anfällt, sondern auch neue, von Endnutzern zumeist schwer nutzbare Klassen entstehen.



Abb. 2: Problem unbestimmter Grenzen sowie vergrößerter Übergangsbereiche am Beispiel der Klassen Wald und Röhricht (Ausschnitt ca. 160 m x 100 m)

2.3 Unterschiedliche Klassifizierungsschemata

Vergleiche zwischen Referenz und Klassifizierungsergebnis gehen grundsätzlich von identischen Klassifizierungsschemata aus. In der Praxis stimmen aufgrund unterschiedlicher Datenquellen, Erfassungsmaßstäbe, zeitlicher Variationen und anderer Ursachen oft aber Anzahl, Bedeutung und Definition der jeweiligen Klassen nicht überein. Tab. 1 gibt für das Bildbeispiel in Abb. 1 typische Referenz- und Klassifizierungs-Schemata, die aufgrund verschiedener Erfassungszeitpunkte sowie Erfassungsmaßstäbe unterschiedliche Teilmengen eines übergeordneten Kartierschlüssels abdecken.

Diese Problematik tritt bei der Nutzung hoch bzw. höchst auflösender Fernerkundungsdaten verstärkt auf, da durch den höheren Detaillierungsgrad komplexere Klassifikationsschemata definiert werden können bzw. müssen. Dies führt nicht nur zu einer Inkonsistenz zum Referenz-

renzschemata, sondern auch zu einer größeren Anfälligkeit bezüglich sich überlappender Objekt- und Attributbeschreibungen sowie zufälliger oder systematischer Zuordnungsfehler bei der Anwendung der Klassifizierungsregeln. Im Idealfall kann eine Anpassung der Schemata durch Aggregation von Klassen erfolgen, teilweise bestehen aber auch keine Zuordnungsmöglichkeiten. Allerdings können auch frühere Klassifizierungsergebnisse aus höchst auflösenden Fernerkundungsdaten mit identischen Klassifizierungsschemata keine korrekten Maßzahlen wiedergeben, da hier natürliche oder anthropogene Veränderungen als Ungenauigkeiten interpretiert werden.

Tab. 1: Inkonsistenz der Klassifizierungsschemata für das Bildbeispiel in Abb. (Biototypenschlüssel nach VON DRACHENFELS 2004)

Referenz aus Feldbegehung	Klassifizierung aus Bildinterpretation
Identische Klassen	
Typisches Weiden-Auengebüsch (BAT)	
Flusswatt-Röhricht (FWR)	
Mäßig ausgebauter Flussunterlauf mit Tideeinfluss (FZT)	
Süßwasser-Marschpriel (KPS)	
Tide-Weiden-Auwald (WWT)	
Isoliert auftretende Klassen	
Flusswatt ohne Vegetation höherer Pflanzen (FWO)	Sonstiger Offenbodenbereich (DOZ)
	Einzelbaum, Baumbestand (HB)
	Naturnaher Sandstrand (KSN)
	Küstenschutzbauwerk (KX)

2.4 Unterschiedliche Sampling-Verfahren

Es ist offensichtlich, dass die Auswahl der Stichproben (Sampling) hinsichtlich Anzahl und Platzierung der Vergleichspunkte die Bestimmung der Kennwerte signifikant beeinflussen kann. Beispielsweise ergeben sich für den gewählten Ausschnitt (siehe Abb. 1) bei einer zufälligen Auswahl von 27 Vergleichspunkten eine Gesamtklassifikationsgenauigkeit von 85 % und ein Kappa-Wert von 0,79. Hingegen betragen die Werte bei einer zufälligen, nach Flächengröße der Klassen gewichteten Verteilung nur noch 59 % bzw. 0,48 sowie bei einer zufälligen, nach Klassen gleichgewichtigen Anzahl 41 % bzw. 0,34. Die deutlichen Unterschiede resultieren vor allem auf der unterschiedlichen Gewichtung der Objektklassen mit geringem Vorkommen in den verschiedenen Verfahren. So werden bei der zufälligen Auswahl ohne jegliche Gewichtung Klassen mit einem geringen Vorkommen (wie hier z.B. Einzelbäume und Offenboden) kaum berücksichtigt und bei dem Verfahren der Gleichgewichtung stark einbezogen. Da diese Klassen im vorliegenden Beispiel in der Referenz nicht existieren, ergeben sich folgerichtig stark veränderte Genauigkeitsmaße.

Grundsätzlich ist bei der Verwendung moderner Fernerkundungsdaten aufgrund der kleineren Bodenpixelgrößen sowie der höheren Anzahl von Bildobjekten für den Vergleich mit der Referenz eine Anpassung der Anzahl und Größe der Stichproben notwendig. Insbesondere erscheint die konventionelle Erfassung von Stichproben auf Pixelbasis aufgrund der geringen Ausdehnung sowie der unberücksichtigten Nachbarschaft als nicht geeignet (CONGALTON & GREEN 1999). Stattdessen wird – analog zum Segmentierungs- bzw. Klassifizierungsprozess selbst – einer Auswahl von flächenhaften Stichproben zu Vergleichszwecken zukünftig eine größere Bedeutung zukommen müssen.

3 Fuzzy Certainty Measure (FCM)

Im Folgenden wird eine alternative Bewertungsmethode skizziert, die Unsicherheiten in den Referenzdaten (siehe Abschnitt 2.1) sowie räumlich-thematische Unschärfen in der Landschaftsbeschreibung (2.2) berücksichtigt. Hierzu werden zunächst Zugehörigkeitswerte für die Klassifizierung *und* die Referenz für jeden Merkmalsträger (Pixel oder Region) jeder Klasse abgeleitet verglichen und hieraus Sicherheitswerte bzw. ein Sicherheitsmaß abgeleitet. Eine ausführliche Darstellung der Methode erfolgt in SCHIEWE & GÄHLER (2006).

Die Güte der Referenzdaten kann entweder durch bekannte Fehlergrößen oder durch Definition unscharfer („Fuzzy“) Übergangsbereiche zwischen den Objektklassen modelliert werden. Da in der Praxis Fehlergrößen oft nicht bekannt sind, werden hier zumindest Übergangszonen eingeführt, um die inhärente räumliche Unschärfe zu modellieren. Gleiches erfolgt für das Klassifizierungsergebnis, das per se ebenfalls unbestimmte Grenzen enthält. Die Übergangszonen werden a posteriori durch Pufferzonen entlang jeder gegebenen Grenze zwischen topographischen Objekten definiert. Die Breite dieser Zonen hängt neben der Größe der benachbarten Objekte hauptsächlich von deren thematischen Klassenkombination ab (z.B. ist die Übergangszone zwischen Wasser und Wiese deutlich höher anzusetzen als zwischen Gebäude und Straße). Für jede Position innerhalb einer Szene wird nun sowohl in der Referenzgrundlage sowie der Klassifizierung die Zugehörigkeit zu allen gegebenen Klassen berechnet. Dabei wird zunächst von symmetrischen Pufferzonen der Objektgrenzen sowie einem linearen funktionalen Modell zur Berechnung der Zugehörigkeitswerte ausgegangen (siehe Abb. 3).

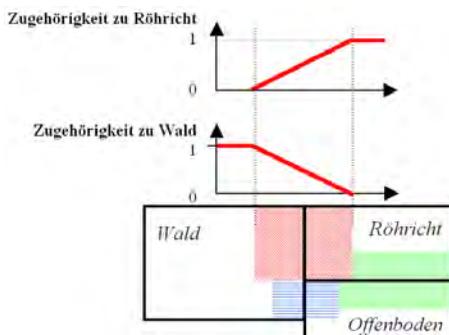


Abb.3: Schematische Darstellung der paarweisen Pufferung entlang von Objektgrenzen und Zuordnung von Zugehörigkeitswerten

Schließlich werden die Zugehörigkeitswerte der Referenzdaten μ_{REF} sowie des Klassifizierungsergebnisses μ_{CLASS} für jede Klasse (c) miteinander verglichen. Man erhält aus der Überlagerung aller n Elemente (z.B. Pixel, Regionen) das **Fuzzy Certainty Measure FCM(c)** für die Klasse c nach:

$$FCM(c) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\mu_{i,REF}(c) - \mu_{i,CLASS}(c)|$$

mit:
 $\mu_{REF}(c)$: Zugehörigkeitswert für die Klasse c in den Referenzdaten
 $\mu_{CLASS}(c)$: Zugehörigkeitswert für die Klasse c in der Klassifikation
 n : Anzahl der Pixel (oder Regionen)

Formel A: Fuzzy Certainty Measure FCM(c) für die Klasse (c)

FCM(c) nimmt Werte zwischen 0 und 1 an – je größer der Wert ist, desto größer ist die Koizidenz zwischen Referenz und Klassifizierung.

Zur Umsetzung dieser alternativen Bewertungsmethode müssen zunächst Übergangsbereiche zwischen verschiedenen Objekt- bzw. Biotoptypenklassen definiert werden. Zur Vereinfachung und aufgrund der Biotoptypenstruktur in dem gewählten Ausschnitt werden zunächst nur zwei unterschiedlich breite Übergangszonen in Abhängigkeit der Klassenkombination definiert. Der Fluss (FZT) erhält aufgrund unterschiedlicher Wasserstände (Tidenhub) einen breiteren Übergangsbereich (10 m) als die restlichen Biotoptypen (5 m). Anschließend erfolgt eine nach dieser Festlegung nach innen und außen angelegte Pufferung der Einzelobjekte, sowohl für die Klassifizierung als auch für die Referenzdaten. Es werden pro Objekt insgesamt 10 Zonen (jeweils 5 innen und außen) kreiert. Das Ergebnis dieser Pufferung mit anschließender Zuweisung von Zugehörigkeitswerten ist beispielhaft für die Klasse KPS (Süßwasser-Marschpriel) sowohl für die Referenz als auch für die Klassifikation für den gewählten Ausschnitt in Abb. 3 dargestellt. Es ist in der Darstellung zu erkennen, dass die Zugehörigkeitswerte an den Objekträndern stark variieren, wobei der stärker ausgeprägte Übergangsbereich zum Wasser visuell kaum zu erfassen ist.

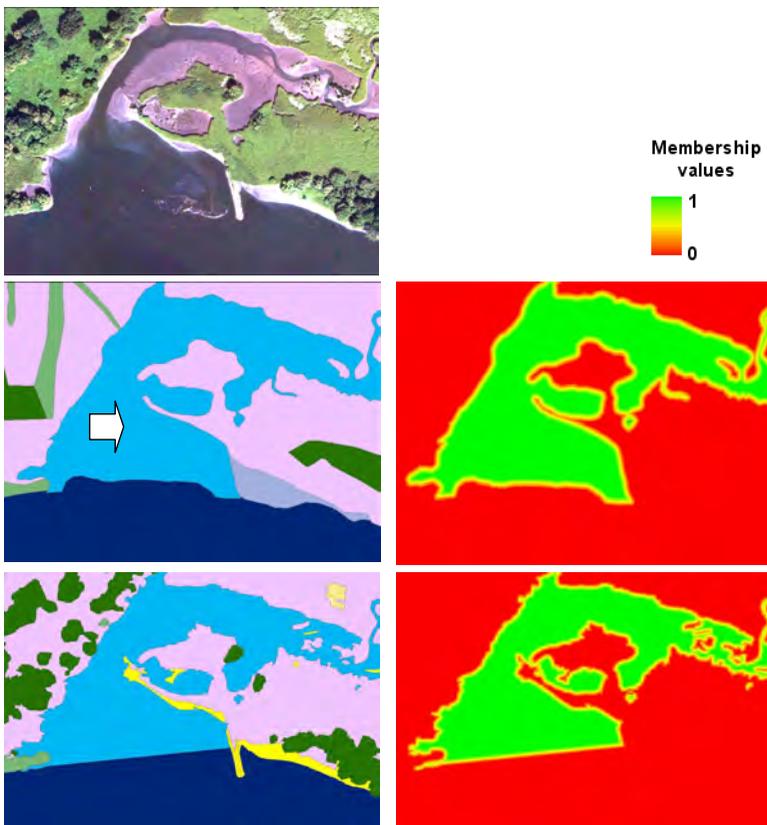


Abb.4: Oben: Luftbild (Ausschnitt ca. 450 m x 320 m)
Mittlere Reihe: aus Feldbegehung abgeleitete Referenz (links) und Visualisierung der Zugehörigkeitswerte $\mu_{REF}(c)$ für die Klasse c (rechts)
Untere Reihe: Klassifikationsergebnis (links) und Visualisierung der Zugehörigkeitswerte $\mu_{CLASS}(c)$ für die Klasse c (rechts)

Insgesamt können nach der oben erläuterten Formel A für den vorliegenden Ausschnitt nur für die in der folgenden Tabelle aufgeführten Biotoptypen Maßzahlen abgeleitet werden, da nur fünf Biotoptypen in der Referenz und in der Klassifikation identisch sind (siehe Abschnitt 2.3). Eine Visualisierung des FCM für die Klasse KPS ist in Abb. 5 dargestellt.

Tab. 2: Berechnete objektklassenspezifische Feature Certainty Measure

Biotoptyp	FMC (c _i)
BAT (Typisches Weiden-Auengebüsch)	0,97
FWR (Flusswatt-Röhricht)	0,86
FZT (Mäßig ausgebauter Flussunterlauf mit Tideeinfluss)	0,97
KPS (Süßwasser-Marschpriel)	0,95
WWT (Tide-Weiden-Auwald)	0,91

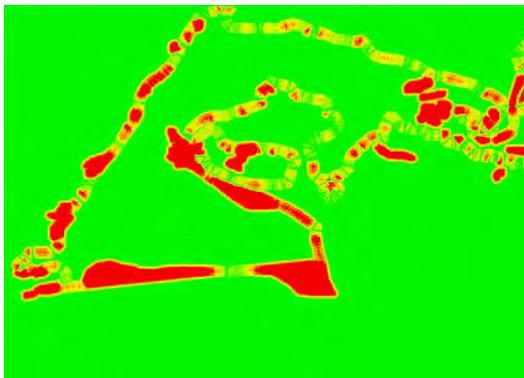


Abb.5: Visualisierung des FCM der Klasse KPS; rote Farben kennzeichnen höhere Unsicherheiten (vgl. Legende in Abb. 4)

Hierauf aufbauend lassen sich ebenfalls die Werte $FCM(c_{jk})$ für eine Konfusionsmatrix durch den Vergleich von $\mu_{REF}(c_j)$ und $\mu_{CLASS}(c_k)$ unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Klassen ($j \neq k$) ableiten.

Letztendlich ist auch die Ableitung eines **Gesamtmaßes FMC** möglich. Hierzu müssen die Sicherheitsmaße aller Klassen (gewichtet) gemittelt werden. Gewichtungsmöglichkeiten könnten in der Berücksichtigung der Flächengröße bzw. -verteilung (A) der verschiedenen Klassen (in Referenz und/oder Klassifikation) sowie der Schutzwürdigkeit der Biotoptypen bestehen.

$$FCM = \frac{\sum_{i=1}^k A_i}{\sum_{i=1}^k A_i} FCM(c_i)$$

Formel B: Gesamtmaß Feature Certainty Measure

4. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Aufgrund der im Abschnitt 2.2 erläuterten Probleme bei der Bestimmung der Güte von Klassifikationen auf Basis höchst auflösender Fernerkundungsdaten sowie der weiter steigenden Bedeutung dieser Daten zur Modellierung von Landschaftsstrukturen und -prozessen besteht die dringende Notwendigkeit, sich mit der Weiterentwicklung fundierter Methoden zur Bestimmung der Klassifikationsgüte auseinander zu setzen. Hierzu wurden alternative Lösungsansätze vorgestellt und getestet. Insbesondere wurde eine Bewertungsmethode vorgestellt, die unscharfe Übergangszonen zwischen benachbarten Objektklassen in Referenz und Klassifizierungsergebnis einführt und ein neues Sicherheitsmaß für Objektklassen durch Vergleich der jeweiligen Zugehörigkeitswerte definiert. Diese Methode ist noch zu verfeinern (z.B. hinsichtlich der Variation der Zugehörigkeitsfunktion) bzw. zu erweitern.

Diverse Grundlagenarbeiten (z.B. HUNTER & GOODCHILD 1995 oder CONGALTON & GREEN 1999) haben jedoch auch deutlich gemacht, dass es kein allgemein gültiges bzw. optimales Modell zur Bestimmung der Klassifikationsgüte gibt bzw. geben kann. Die Methoden der Verifikation müssen an die speziellen Bedingungen einer Klassifikation (Daten- und Gebiets-eigenschaften, Verfügbarkeit und Qualität der Referenzinformationen), die die Art und die räumlichen Muster der Fehler beeinflussen, angepasst werden. Demnach können die Verfahren der Genauigkeitsüberprüfung nur bedingt standardisiert werden, insofern können auch die hier vorgestellten alternativen Bewertungsmethoden sicherlich keine Allgemeingültigkeit erreichen.

5 Literaturverzeichnis

- CONGALTON, R. (1991): A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. - *Remote Sensing of Environment*. Vol. 37, S. 35-46.
- CONGALTON, R. G. & K. Green (1999): *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. Lewis Publishers.
- FOODY, G.M. (2004): Thematic Map Comparison: Evaluating the Statistical Significance of Differences in Classification Accuracy. - *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 70 (5): S. 627-633.
- HUNTER, G.J. & GOODCHILD, M.F. (1995): Dealing with Error in Spatial Databases: A Simple Case Study. - *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 61 (5): S. 529-537.
- SCHIEWE, J. & GÄHLER, M. (2006): Modelling uncertainty in high resolution remotely sensed scenes. - 1st International Conference on Object-based Image Analysis (OBIA), Salzburg.
- THOMAS, N., C. HENDRIX, AND R. CONGALTON. (2003): A comparison of urban mapping methods using high-resolution digital imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 69, 9. S. 963-972.
- VON DRACHENFELS, O. (2004): Kartierschlüssel für Biotoptypen in Niedersachsen. *Naturschutz und Landschaftspflege in Niedersachsen*, Heft A/4.
- WANG, F. (1990): Improving Remote Sensing Image Analysis through Fuzzy Information Representation. - *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 56 (8), S. 1163-1169.

Anwendung des Facetten-Stereosehens auf Bilddaten der HRSC auf Mars Express

STEPHAN GEHRKE¹, ISABEL HAASE¹

Zusammenfassung: Der Zeilenscanner High Resolution Stereo Camera (HRSC) an Bord des „Mars Express“ Orbiters liefert dreidimensionale Farbbilder von unserem Nachbarplaneten. Insgesamt werden neun Kanäle – fünf panchromatische in Stereowinkeln von maximal 18,9° und vier Farbkanäle – in Bodenaufösungen bis 12 m/Pixel simultan aufgenommen. Auf Grund dessen sind die HRSC-Daten prädestiniert für die Ableitung Digitaler Geländemodelle (DGM) und farbiger Orthobilder.

Im Gegensatz zur systematischen Prozessierung sämtlicher Bilddaten, die auf klassischem Image-Matching zwischen den Stereokanälen basiert, wurde im Rahmen der hier vorgestellten Arbeiten das Facetten-Stereosehen exemplarisch auf HRSC-Bilder angewendet. Das Facetten-Stereosehen ist ein flexibler Ansatz zur Bildinversion im Objekt-raum. Es ermöglicht die integrierte Bestimmung von DGM und Orthobild unter Berücksichtigung der gesamten Bildinformation, d.h. sämtlicher aufgenommener Pixel. Der Algorithmus wurde für die HRSC auf Mars Express angepasst, in MATLAB implementiert und auf kleine Regionen der Mars-Oberfläche angewendet – die Größe eines Auswertebereichs liegt im Bereich weniger Kilometer; typische Eingangsbilder umfassen etwa 200x200 Pixel in drei Kanälen (die beiden äußeren Stereokanäle und der Nadirkanal der HRSC). Für diese Regionen wurden DGMs mit Stützstellen im Abstand von 200 m sowie Orthobilder mit 25 m/Pixel generiert. Der verwendete Ansatz sowie erste Ergebnisse dieser Arbeiten werden vorgestellt.

1 Einleitung

Mit der High Resolution Stereo Camera (HRSC) an Bord der Europäischen Raumfahrtmission Mars Express wird die Oberfläche unseres Nachbarplaneten erstmals systematisch in Farbe und Stereo aufgenommen. Innerhalb einer Aufnahmesequenz (Bildstreifen) werden gleichzeitig vier Spektralkanäle (rot, grün, blau und infrarot) sowie fünf panchromatische Kanäle erfasst, letztere angeordnet in Stereowinkeln von 0° (Nadirkanal), $\pm 12,9^\circ$ (Photometriekanäle) und $\pm 18,9^\circ$ (Stereokanäle). Die maximale Bodenauflösung beträgt im mars-nächsten Punkt des Orbits ca. 12 m/Pixel für den Nadirkanal; die Bilddaten der Stereo- und Photometriekanäle werden in der Regel in geringerer Auflösung gespeichert, d.h. 2x2 bzw. 4x4 Pixel werden zu Makropixeln zusammengefasst (NEUKUM et al., 2004).

Für sämtliche HRSC-Daten werden innerhalb weniger Tage nach ihrer Aufnahme am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) systematisch Digitale Geländemodelle (DGM) mit einer Rasterweite von 200 m und – darauf aufbauend – farbige Orthobildmosaiken mit Auflösungen bis zu 12,5 m erstellt. Die photogrammetrische Prozessierung basiert dabei auf einer Bildzuordnung (Image Matching) zwischen den einzelnen Kanälen (SCHOLTEN et al., 2005). Neben dieser Standardverarbeitung gibt es ergänzende Verfahren, wie beispielsweise die Anpassung an das MOLA-DGM (SPIEGEL et al., 2005; siehe Abschnitt 2.3), sowie

¹ Technische Universität Berlin, Geodäsie und Geoinformationstechnik, Sekr. H 12, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin, E-Mail: stephan@igg.tu-berlin.de, isabel.haase@gmx.de

andere Auswertungsansätze, welche allerdings auch auf Image Matching bzw. Shape-from-Shading basieren; einen Überblick geben ALBERTZ et al. (2005) und HEIPKE et al. (2005). Unter Verwendung der nach SPIEGEL et al. (2005) verbesserten Orientierungsdaten sowie adaptiver Verarbeitungskomponenten können qualitativ hochwertige DGMs mit Rasterweiten von 50 m abgeleitet werden (GWINNER et al., 2005).

Ein grundsätzlich anderer Ansatz zur Objektrekonstruktion aus Bilddaten ist das *Facetten-Stereosehen* (WROBEL, 1987; WEISENSEE, 1992; SCHLÜTER, 2000). Im Gegensatz zum klassischen Matching zwischen den Bildern wird hier die Bildzuordnung im Objektraum durchgeführt. Das Verfahren ermöglicht die integrierte Bestimmung von DGM, Orthobild und Reflexionsmodell in einer Ausgleichung unter Berücksichtigung der gesamten Bildinformation, d.h. sämtlicher aufgenommener Pixel. Die Objektmodelle werden dabei bezüglich der Stützstellen von regelmäßigen Lagerastern, den Facetten, bestimmt. Auf Grund der gemeinsamen Berechnung werden existierende Zusammenhänge implizit berücksichtigt.

Der Algorithmus des Facetten-Stereosehens wurde an die Bahnparameter der Sonde *Mars Express*, die Aufnahmekonfiguration sowie die Zeilenscanner-Geometrie der HRSC angepasst und in MATLAB implementiert (GEHRKE et al., 2006). Die exemplarisch für kleine Regionen der Mars-Oberfläche erzielten Ergebnisse werden nachfolgend dargestellt.

2 Bildzuordnung im Objektraum: Facetten-Stereosehen

Das *Facetten-Stereosehen* ist ein photogrammetrisches Verfahren zur Bildzuordnung im Objektraum. Es geht auf WROBEL (1987) zurück und wurde unter anderem von WEISENSEE (1992), WROBEL et al. (1992) und WENDT (2002) weiterentwickelt. Ein möglicher Ansatz für die Auswertung von Zeilenscannerdaten wurde von SCHLÜTER (2000) vorgestellt. Eingangsdaten für das *Facetten-Stereosehen* sind sämtliche Pixel (Grauwerte) aus allen an der Auswertung beteiligten Bildern bzw. Kanälen. In einer Ausgleichung werden die Objektmodelle, d.h. die unbekanntenen Größen in den Stützstellen der DGM- und Grauwertfacetten, bestimmt.

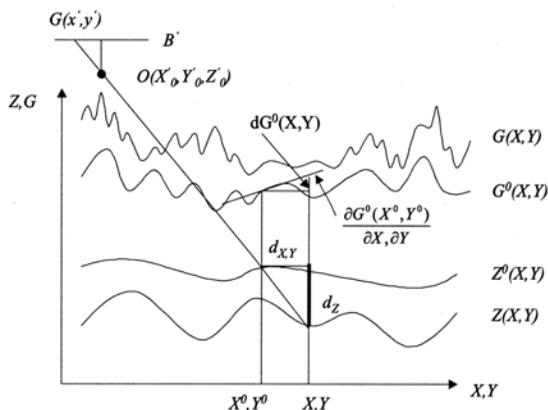


Abb. 1: Facetten-Stereosehen: Zusammenhang zwischen den Objektmodellen – Höhen Z und Grauwerte G (Näherungswerte Z^0 und G^0) – mit dem Bild $G(x', y')$, nach WENDT (2002)

2.1 Grundgleichung

Wie in Abb. 1 ersichtlich, sind Bild (Pixel) und Objektoberfläche (Surfel = surface elements) über Kamerapositionen und -orientierungen verknüpft: Ein Projektionsstrahl verläuft zwischen einem Objektpunkt (X^0, Y^0, Z^0) und einer Kameraposition (X'_0, Y'_0, Z'_0) . Der radiometrische Zusammenhang zwischen den Objektgrauwerten $G(X, Y)$ und den Bildgrauwerten $G'(x', y')$, $G''(x'', y'')$, usw. resultiert aus Reflexionseigenschaften; er wird durch Transferfunktionen T' , T'' für jedes Bild ausgedrückt:

$$G(X, Y) = T' [G'(x', y')] = T'' [G''(x'', y'')] = \dots \quad (1)$$

Die Entwicklung von $G(X, Y)$ in eine Taylorreihe um (X^0, Y^0) ergibt

$$\begin{aligned} G(X, Y) &= G^0(X^0 + dX, Y^0 + dY) + dG^0(X^0, Y^0) \\ &\approx G^0(X^0, Y^0) + \frac{\partial G^0(X^0, Y^0)}{\partial X} dX + \frac{\partial G^0(X^0, Y^0)}{\partial Y} dY + dG^0(X^0, Y^0) \end{aligned} \quad (2)$$

wobei dX und dY über den Projektionsstrahl mit den Höhenänderungen dZ verknüpft sind:

$$dX = \frac{\partial X}{\partial Z} dZ = \frac{X^0 - X'_0}{Z^0 - Z'_0} dZ \quad (3)$$

$$dY = \frac{\partial Y}{\partial Z} dZ = \frac{Y^0 - Y'_0}{Z^0 - Z'_0} dZ \quad (4)$$

Die Gleichungen (3) und (4) sowie eine Kombination von (1) und (2) führen zur Grundgleichung des *Facetten-Stereosehens*. Diese verbindet (gegebene) Bildgrauwerte mit (gesuchten) Objektgrauwerten, -höhen und Reflexionseigenschaften (Transferfunktion):

$$G'(x', x') = T'^{-1} \left\{ \begin{aligned} &G^0(X^0, Y^0) + dG^0(X^0, Y^0) \\ &+ \left[\frac{\partial G^0(X^0, Y^0)}{\partial X} \frac{X^0 - X'_0}{Z^0 - Z'_0} + \frac{\partial G^0(X^0, Y^0)}{\partial Y} \frac{Y^0 - Y'_0}{Z^0 - Z'_0} \right] dZ \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Mit der Definition geeigneter Facetten (siehe 2.2) können dann die Objekteigenschaften – Höhenänderungen dZ und Grauwertzuschläge dG^0 – iterativ in einer vermittelnden Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate geschätzt werden.

2.2 Objektmodelle

Zur Berechnung von Orthobild und DGM müssen – in Anlehnung an die Bildauflösung – regelmäßige Facetten für beide Objektmodelle, d.h. die Koordinaten der Stützstellen (X_i, Y_j) bzw. (X_k, Y_l) , definiert werden. Ein beliebiger Punkt innerhalb dieser Facetten lässt sich dann mittels stückweise glatter Polynome, üblicherweise über bilineare Interpolation, beschreiben.

Damit können die Näherungshöhen und Höhenzuschläge bezüglich der jeweiligen Werte in den Stützstellen des DGM-Rasters ausgedrückt werden:

$$Z^0(X^0, Y^0) = \sum_i \sum_j \alpha_{ij}(X^0, Y^0) Z^0_{ij} \quad (6)$$

$$dZ(X^0, Y^0) = \sum_i \sum_j \alpha_{ij}(X^0, Y^0) dZ_{ij} \quad (7)$$

Bezogen auf das Orthobildraster gilt analog für die Grauwerte:

$$G^0(X^0, Y^0) = \sum_k \sum_l \alpha_{kl}(X^0, Y^0) G^0_{kl} \quad (8)$$

$$dG^0(X^0, Y^0) = \sum_k \sum_l \alpha_{kl}(X^0, Y^0) dG_{kl} \quad (9)$$

Die in Gleichung (5) benötigten Grauwertgradienten lassen sich wie folgt beschreiben:

$$\frac{\partial G^0(X^0, Y^0)}{\partial X} = \sum_k \sum_l \frac{\partial G^0(X^0, Y^0)}{\partial \alpha_{kl}(X^0, Y^0)} \frac{\partial \alpha_{kl}(X^0, Y^0)}{\partial X} \quad (10)$$

$$\frac{\partial G^0(X^0, Y^0)}{\partial Y} = \sum_k \sum_l \frac{\partial G^0(X^0, Y^0)}{\partial \alpha_{kl}(X^0, Y^0)} \frac{\partial \alpha_{kl}(X^0, Y^0)}{\partial Y} \quad (11)$$

Es sei angemerkt, dass DGM- und Grauwertfacetten nicht die gleiche Größe aufweisen müssen; üblicherweise wird für ein DGM ein größeres Raster als für das Orthobild definiert.

2.3 Ansatz zur Auswertung von HRSC-Daten

Im Unterschied zu SCHLÜTER (2000), der Flugzeug-Zeilenscannerdaten mit dem direkten Ansatz des *Facetten-Stereosehens* auswertet, wird in diesem Rahmen die indirekte Methode auf HRSC-Daten angewendet. Ein solches Vorgehen wurde bereits von WEISENSEE (1992) bzw. DIEHL & HEIPKE (1992) vorgeschlagen und von ANDERSSOHN (2004), unter Verwendung simulierter Bilddaten, sowie GEHRKE et al. (2006) für die Mars-Oberfläche getestet.

Im indirekten Ansatz werden die Facettenrasterpunkte mit den Lagekoordinaten (X_k, Y_l) und den Näherungshöhen Z^0 unter Verwendung bekannter innerer und äußerer Orientierungen (siehe unten) in die HRSC-Bildstreifen projiziert und anschließend Pseudobeobachtungen interpoliert. Da jede einzelne HRSC-Zeile ihre individuelle äußere Orientierung aufweist, ist dies ein iterativer Prozess. Die Beobachtungen beziehen sich nun direkt auf die Grauwertstützstellen, und die eigentliche Ausgleichung vereinfacht sich – siehe Gleichungen (8) bis (11). Dem Vorschlag von WEISENSEE (1992) und den Untersuchungen von ANDERSSOHN (2004) folgend, wird die Berechnung von Orthobild und DGM in zwei Schritten vollzogen: Als Orthobild wird das Mittel sämtlicher Pseudobilder genutzt; das DGM kann dann in einer Ausgleichung mit einer wesentlich geringeren Zahl der Unbekannten – da es sich aus deutlich größeren Facetten als das Orthobild zusammensetzt – berechnet werden. Der beschriebene Algorithmus muss iterativ, beginnend mit der Berechnung der Pseudobeobachtungen, ausgeführt werden, bis keine signifikanten Höhenänderungen mehr auftreten. Mit dem Ziel der Helligkeits- und Kontrastanpassung zwischen den einzelnen Bildern werden in diesem Rahmen lineare Transferfunktionen angesetzt.

Die Untersuchungen bauen auf den Ergebnissen der Bündelblockausgleichung auf; dabei wurden Lage und Orientierung der Sonde *Mars Express* an ein DGM basierend auf Daten des

Mars Observer Laser Altimeter (MOLA) angepasst. Dieses MOLA-DGM bietet die genaueste, global vorliegende Referenzfläche des Mars mit einer Höhengenaugigkeit im Meterbereich (SMITH et al., 2003). Durch die Anpassung wird die Positionsgenauigkeit des Orbiters von etwa 1000 m auf 30 m reduziert (SPIEGEL et al., 2005); sie wird daher als bekannt vorausgesetzt. Das MOLA-DGM liefert auch die benötigten Näherungshöhen, in der hier verwendeten Version mit einem Punktabstand von 5 km.

Die HRSC wurde vor dem Start von *Mars Express* kalibriert, d.h. für sämtliche Pixel liegen Koordinaten im Kamerasystem vor. Die innere Orientierung ist damit bekannt.

3 Anwendung des Facetten-Stereosehens für HRSC-Daten

Der angepasste, indirekte Algorithmus des *Facetten-Stereosehens* wurde in MATLAB implementiert und auf HRSC-Daten der Mars-Oberfläche angewendet. Im Vergleich zur systematischen Prozessierung ganzer Orbits können hier nur kleine Regionen bearbeitet werden.

3.1 Testgebiete

Für die Anwendung des *Facetten-Stereosehens* wurden zwei Gebiete aus dem Xanthe Terra gewählt (Abb. 2):

- **Talverlauf** (313,4° Ost / 9,2° Nord; 5,4 km x 5,4 km). Die Ausläufer der Hypanis Valles sind von Auswurfmaterialien des südlichen Meteoriteneinschlags überlagert. Bei leichtem Süd-Nord-Gefälle liegen die Höhenunterschiede im Gebiet unter 200 m.
- **Kraterrand** (313,4° Ost / 8,9° Nord; 5,4 km x 5,4 km). Der Südrand dieses namenlosen Einschlagkraters fällt im bearbeiteten Gebiet um mehr als 1000 m ab.



Abb. 2: Übersicht der Bearbeitungsgebiete im Xanthe Terra, obere Region: Talverlauf, untere Region: Kraterrand

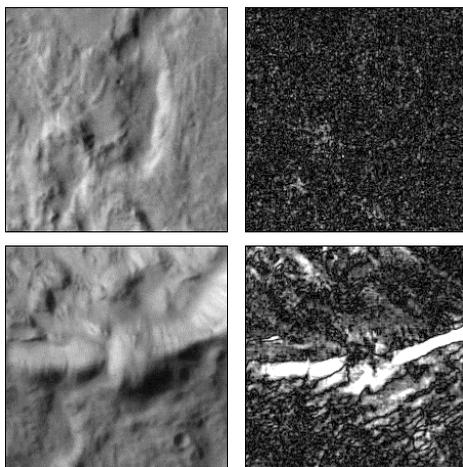


Abb 3: Mit Näherungshöhen berechnete Mittel-(links) sowie Differenzbilder (rechts) für das Tal (oben) und den Kraterrand (unten); Bilder kontrastverstärkt

3.2 Eingangsdaten

Für die Berechnungen wurden Daten aus dem Nadirkanal und den beiden äußeren Stereokanälen der HRSC aus dem Orbit 894 verwendet. Die Bodenauflösung beträgt im Nadir etwa 15 m/Pixel, für die Stereokanäle im Makropixelformat 2x2 entsprechend 30 m/Pixel. Auf die Daten der Photometriekanäle, die in diesem Orbit eine Bodenauflösung von nur 60 m/Pixel aufweisen, wurde für die Untersuchungen verzichtet. Die auf dem MOLA-DGM basierenden, ersten Mittelbilder der jeweils drei verwendeten Kanäle (Pseudo-Orthobilder) sind für beide Testgebiete in Abb 3 (links) dargestellt. Die originalen HRSC-Daten umfassen dabei einen Bereich von ca. 50 Grauwerten für den Talverlauf bzw. ca. 65 Grauwerten für den Kratertrand; für die Darstellung wurde der Kontrast verstärkt.

Bei Gebietsgrößen von jeweils 5,4 km x 5,4 km wird deutlich, dass das verwendete MOLA-DGM mit einem Punktabstand von 5 km nur den Trend des Geländes wiedergeben kann (vgl. Abb. 4, obere Grafik, für den Talverlauf). So ist beispielsweise auch der gegenüber seiner Umgebung deutlich erhöhte Kratertrand nicht modelliert – die Höhenabweichungen liegen im Bereich einiger 100 m und müssen durch das *Facetten-Stereosehen* korrigiert werden. Die daraus resultierenden Lageversätze (siehe Gleichungen (3) und (4)) werden in Abb 3 im Mittelbild, in dem sich der Kratertrand dreifach andeutet, vor allem aber in einem Differenzbild der beiden Stereokanäle deutlich. Im Gebiet des Talverlaufs treten auf Grund der an sich geringen Höhenunterschiede auch geringere Abweichungen zwischen den Bildern auf – sie deuten sich beispielsweise für die beiden Hügel im südwestlichen Bereich an.

3.3 Ableitung von DGM und Orthobild

Die gemeinsame Berechnung von Orthobild und DGM mit dem *Facetten-Stereosehen* setzt die Definition geeigneter Facetten voraus. In Anbetracht der Auflösung der HRSC-Daten von 15 m bzw. 30 m wurde eine Facettengröße von 25 m für das Orthobild gewählt, bei 5400 m x 5400 m Ausdehnung entspricht dies 217 x 217 Pixeln. Basierend auf den Untersuchungen von WROBEL et al. (1992) und insbesondere ANDERSSOHN (2004) wurden die DGM-Facetten in den Berechnungen sukzessive von 900 m x 900 m bis auf 200 m x 200 m verkleinert (vgl. Tabelle 1), wobei die Ergebnisse – nach einer 3x3 Tiefpassfilterung (GEHRKE et al., 2006) – jeweils als Näherungswerte für die Folgeausgleichung dienen. Die letztendlich erzielte Lageauflösung entspricht den am DLR systematisch erstellten HRSC-DGMs (SCHOLTEN et al., 2005). Die Topographie der Testgebiete ist damit in 27 x 27 Facetten repräsentiert.

Jeder Schritt der sukzessiven Berechnung wurde in zehn Iterationen durchgeführt. Für sämtliche Ausgleichungen setzen sich die (Pseudo-)Beobachtungen aus je 217 x 217 Pixeln der drei Kanäle zusammen, insgesamt 141 267. Für die ersten Iterationen sind $49 = (6+1)^2$, in der höchsten Auflösung schließlich $784 = (27+1)^2$ unbekannte Höhen für die DGM-Stützstellen zu bestimmen. Die Ausgleichungsergebnisse, Höhenzuschläge aus den jeweils ersten vier Iterationen, sind in Tabelle 2 für den Talverlauf und in Tabelle 3 für den Kratertrand angegeben.

Tabelle 1: Facettengrößen für die sukzessive Prozessierung

Facettengröße des DGM in [m]	900 ²	450 ²	300 ²	200 ²
Anzahl DGM-Facetten	6 ²	12 ²	18 ²	27 ²
Bildpixel pro DGM-Facette	36 ²	18 ²	12 ²	8 ²

Tabelle 2: Höhenzuschläge (Mediane der Beträge) für den Talverlauf, Angaben in [m]

Iteration	900 ²	450 ²	300 ²	200 ²
1	23,5 ± 3,9	20,8 ± 7,3	20,3 ± 10,8	26,7 ± 16,2
2	9,0 ± 3,6	7,1 ± 7,2	6,6 ± 10,7	8,3 ± 15,9
3	3,1 ± 3,6	2,5 ± 7,2	2,5 ± 10,6	4,0 ± 15,9
4	1,0 ± 3,6	1,2 ± 7,2	1,6 ± 10,7	2,8 ± 15,8

Tabelle 3: Höhenzuschläge (Mediane der Beträge) für den Kraterrand, Angaben in [m]

Iteration	900 ²	450 ²	300 ²	200 ²
1	66,4 ± 6,4	43,3 ± 7,6	37,8 ± 9,8	34,1 ± 13,8
2	40,0 ± 4,5	34,8 ± 6,5	36,0 ± 9,3	31,9 ± 13,5
3	47,5 ± 4,2	34,7 ± 6,3	35,5 ± 9,3	31,4 ± 13,5
4	47,8 ± 4,2	33,6 ± 6,3	35,0 ± 9,2	31,1 ± 13,4

Wie zu erwarten, konvergieren im Gebiet des Talverlaufs (Tabelle 2) die durchschnittlichen Höhenzuschläge für die jeweiligen Facettierungsstufen über die einzelnen Iterationen gegen null. Jede neue, kleinere Facettierung erlaubt die Modellierung feinerer morphologischer Formen, so dass sich dann wiederum Höhenzuschläge ergeben. In der kleinsten Facettierung von 200 m sind diese allerdings kaum noch signifikant. Die Standardabweichungen steigen mit Abnahme der Redundanz an – die Zahl der Beobachtungen pro DGM-Facette reduziert sich über die einzelnen Rechenschritte (vgl. Tabelle 1). In Abb. 4 sind am Beispiel des Talverlaufs die Höhenmodelle für unterschiedliche Berechnungsschritte in farbkodierten Perspektivansichten dargestellt – angefangen vom MOLA-DGM (oben), wo die Geländeformen noch nicht erkennbar sind, über die erste, grobmaschige Parametrisierung (Mitte), in der sich bereits Talsenken sowie die beiden im Südosten gelegenen Hügel andeuten, bis hin zum endgültigen Geländemodell mit 200 m Lageauflösung (unten).

Bei Betrachtung der Ergebnisse für den Kraterrand in Tabelle 3 fällt auf, dass sich die Höhenzuschläge ab der zweiten Iteration kaum noch reduzieren – sie konvergieren nicht gegen null und bleiben, zumindest für die ersten drei Facettierungen (bis 300 m), auch signifikant. Dieser Effekt ist auf die Tiefpassfilterung zurückzuführen: Bei großen Höhenunterschieden wirkt sich diese Glättung stärker aus. Ohne die Filterungen würden die Höhenzuschläge zwar kontinuierlich abnehmen, in den Randbereichen des Gebietes aber auch einzelne Ausreißer auftreten. Die Ergebnisse der entsprechenden Berechnung einschließlich veranschaulichender Perspektiven werden von GEHRKE et al. (2006) diskutiert.

Trotz des unterschiedlichen Charakters der beiden Testgebiete ergeben sich ähnliche Standardabweichungen der Höhenzuschläge. Neben der Facettierung scheint die Genauigkeit also eher von der (für beide Testgebiete identischen) Aufnahmeconfiguration und Datenqualität, d.h. Bildauflösung etc., als von den Höhenunterschieden des Terrains abzuhängen.

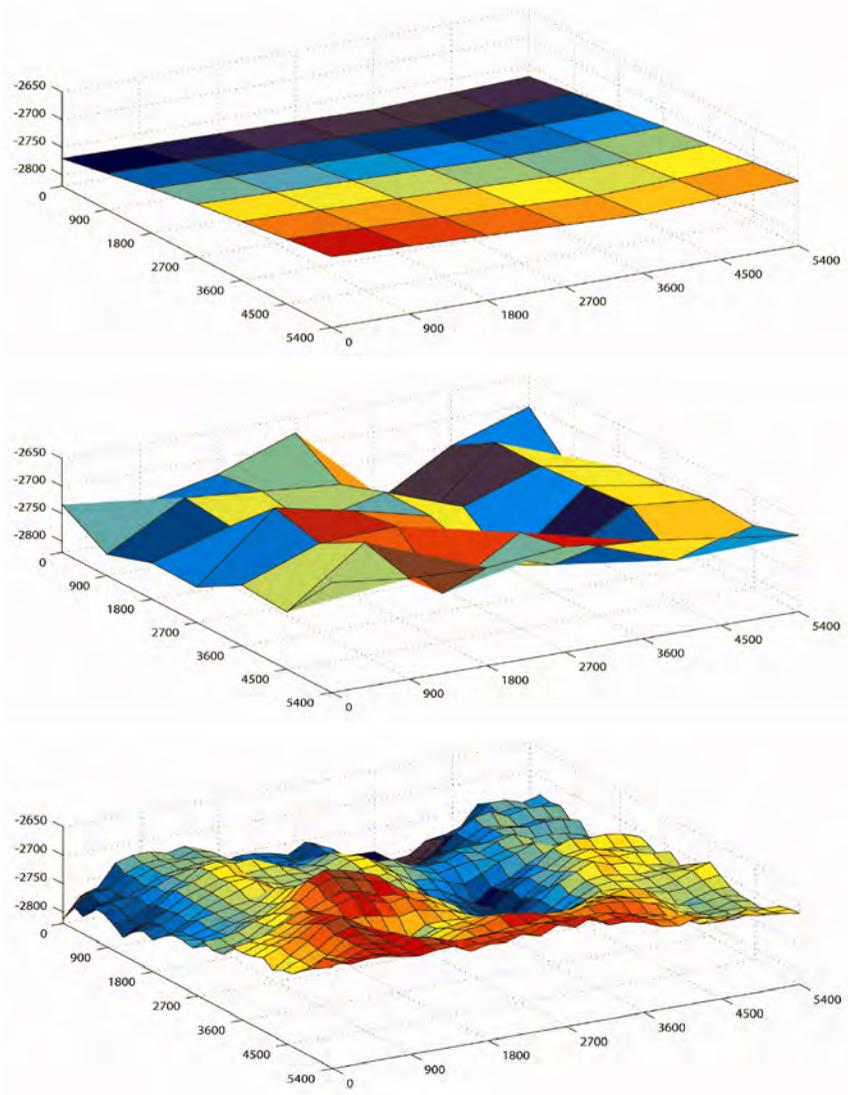


Abb. 4: Perspektivansichten des DGMs des Talverlaufs in verschiedenen Berechnungsschritten; Oben: MOLA-DGM (Punktdichte für den ersten Berechnungsschritt von 5000 m auf 900 m reduziert), Mitte: Ergebnis der ersten Facettierungsstufe (900 m) nach 10 Iterationen, Unten: Endergebnis mit 200 m Rasterweite

4 Bewertung der Ergebnisse

Um die beiden mit dem *Facetten-Stereosehen* erzielten Resultate gemeinsam bewerten zu können, wurden aus den DGMs Höhenlinien abgeleitet und den gewonnenen Orthobildern überlagert. Für den Orbit 894, dessen Daten dieser Arbeit zu Grunde liegen, wurde außerdem mit der adaptiven Prozessierung von GWINNER et al. (2005) ein DGM mit einer Rasterweite von 50 m generiert; damit bietet sich eine unabhängige Vergleichsmöglichkeit der Ergebnisse. Aus dem Gesamtdatensatz des Orbits wurden für die beiden Testgebiete Höhenlinien abgeleitet und entsprechenden Ausschnitten aus dem systematisch prozessierten Orthobild des Nadirkanals (vgl. SCHOLTEN et al., 2005) überlagert – vgl. Abb. 5 und Abbildung 6.

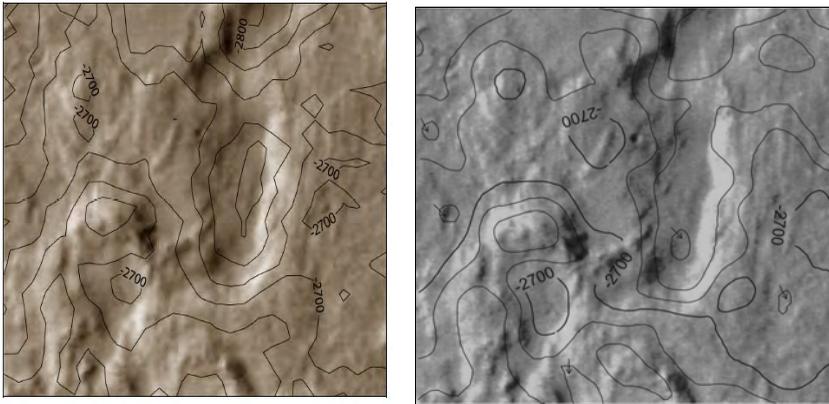


Abb. 5: Talverlauf aus *Facetten-Stereosehen* (links) und adaptiver Prozessierung (rechts); Äquidistanz der Höhenlinien: 25 m

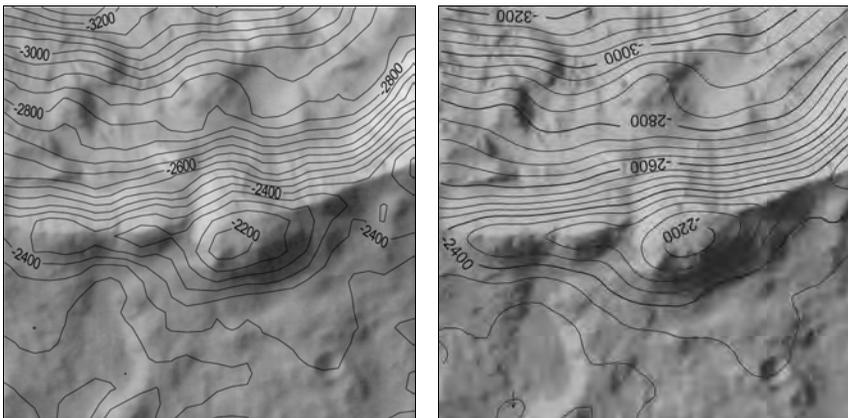


Abbildung 6: Kraterrand aus *Facetten-Stereosehen* (links) und adaptiver Prozessierung (rechts); Äquidistanz der Höhenlinien: 50 m

Bei Betrachtung der mit unterschiedlichen Verfahren berechneten Ergebnisse lässt sich feststellen, dass sie für beide Bearbeitungsgebiete sowohl in der absoluten Höhe als auch in ihrer Detailtreue und der Modellierung morphologischer Geländeformen sehr gut übereinstimmen. Die Höhenlinienverläufe am Kraterrand (Abbildung 6) sind ähnlich; in dem in Abb. 5 dargestellten, deutlich flacheren Gebiet ergeben sich naturgemäß einige Lageunterschiede. Während die Linien auf Basis der adaptiven DGM-Generierung mit einer nominellen Lageauflösung von 50 m generell sehr glatt verlaufen, zeigen die in diesem Rahmen für 200 m große Facetten erzielten Ergebnisse vereinzelt Knicke. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass diese Höhenlinienbilder aus nur 27 x 27 Facetten resultieren.

5 Fazit und Ausblick

An Hand der präsentierten Arbeiten wurden erste Erfahrungen mit der Prozessierung von Daten der HRSC auf *Mars Express* mit dem *Facetten-Stereosehens* gesammelt. Die abgeleiteten Orthobilder und DGMs demonstrieren sowohl die Leistungsfähigkeit als auch Flexibilität dieses Auswerteverfahrens. Auf Basis eines MOLA-DGMs mit 5 km Rasterweite konnten eindrucksvolle Ergebnisse für zwei unterschiedliche Regionen, sowohl für flaches Terrain als auch für einen steilen Kraterrand, erzielt werden. Die aus den DGMs abgeleiteten Höhenlinien zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit unabhängig berechneten Modellen.

An Hand der exemplarisch ausgewerteten Gebiete und vor allem mit der weiterführenden Anwendung des *Facetten-Stereosehens* auf andere Regionen der Mars-Oberfläche soll der hier verwendete Ansatz weiter untersucht und optimiert werden. Hier sind beispielsweise die Auswirkungen der DGM-Filterung bzw. einer adaptiven Regularisierung (vgl. WROBEL et al., 1992) zu nennen. Je nach Datenqualität (Kompressionseffekte) könnte sich zudem die von GWINNER et al. (2005) angewendete Tiefpassfilterung der HRSC-Eingangsdaten auch für deren Verarbeitung mit dem *Facetten-Stereosehens* als vorteilhaft erweisen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden lineare Transferfunktionen zum Ausgleich von Kontrast- und Helligkeitsunterschieden zwischen den einzelnen HRSC-Bildern angesetzt. Ein solches Vorgehen ist jedoch nicht physikalisch motiviert; implizit wird die Lambertsche Reflexion angenommen. Das *Facetten-Stereosehen* ist grundsätzlich flexibel im Hinblick auf die Einführung eines richtungsabhängigen Reflexionsmodells, so dass die Mars-Oberfläche geometrisch und radiometrisch vollständig parametrisiert wäre. Die Implementierung und Untersuchung eines entsprechenden Ansatzes zur gemeinsamen Bestimmung dieser Objektmodelle ist Gegenstand weiterführender Forschungsarbeiten.

6 Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten sind Teil des an der *Technischen Universität Berlin* laufenden Forschungsvorhabens „Software Development and Technical Support for Cartographic Data Processing“ im Rahmen des Experiments „HRSC on Mars Express“. Dieses Vorhaben wird durch das DLR aus Mitteln des *Bundesministeriums für Bildung und Forschung* (BMBF) gefördert. Principal Investigator des Experiments ist Prof. Dr. Gerhard Neukum, Freie Universität Berlin.

Die Autoren danken weiterhin Klaus Gwinner, DLR Berlin-Adlershof, für die Bereitstellung der DGM-Vergleichsdaten.

7 Literaturverzeichnis

- ALBERTZ, J., ATTWENGER, M., BARRETT, J., et al., 2005: HRSC on Mars Express – Photogrammetric and Cartographic Research. – Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (RE&RS), 71 (10): 1153-1166.
- ANDERSSOHN, J., 2004. Untersuchungen zur objektraumbasierten Bildrekonstruktion (Facetten-Stereosehen) an Hand von Bilddaten der Mars-Oberfläche. – Diplomarbeit, Technische Universität Berlin. Kurzfassung in: Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG), 2004(7): 578-579.
- GEHRKE, S., SCHNEIDER, I., NEUKUM, G., 2006: Combined Derivation of Orthoimages and DTM from Mars Express HRSC Data by Means of Matching in Object Space. – Proceedings 5th Turkish-German Joint Geodetic Days, Berlin.
- GWINNER, K., SCHOLTEN, F., GIESE, B., et al., 2005: Hochauflösende Digitale Geländemodelle der Marsoberfläche. – Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG), 5/2005: 387-394.
- HEIPKE, C., ALBERTZ, J., et al., 2005: HRSC auf Mars Express – Photogrammetrische und kartographische Auswertungen. – Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV), 130(6): 379-386.
- NEUKUM, G. et al., 2004: The High Resolution Stereo Camera of Mars Express. – ESA Special Publication, SP-1240.
- SCHLÜTER, M., 2000: Das Facetten-Stereosehen und die neue Generation digitaler Luftbildkameras. – Festschrift zum 65. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. B.P. WROBEL, Schriftenreihe der Fachrichtung Vermessungswesen der TU Darmstadt, 2000: 215-222.
- SCHOLTEN, F., ROATSCH, T., GWINNER, K. et al., 2005: Von Rohdaten aus dem Mars Express Orbit zu Digitalen Geländemodellen und Orthobildern – Operationelle Verarbeitung von HRSC Daten. – Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG), 5/2005: 365-372.
- SMITH, D.E. et al., 2001: Mars Orbiter Laser Altimeter: Experiment Summary after the First Year of Global Mapping of Mars. – Journal of Geophysical Research (JGR), 106 (E10): 23 689-23 722.
- SPIEGEL, M., STILLA, U., GIESE, B. et al., 2005: Bündelausgleichung von HRSC-Bilddaten mit Mars Observer Laser Altimeter-Daten als Passinformationen. – Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG), 5/2005: 381-386.
- WEISENSEE, M., 1992: Modelle und Algorithmen für das Facetten-Stereosehen. – Dissertation, DGK-Reihe C, München.
- WENDT, A., 2002: Gemeinsame Ausgleichung von Laserscannerdaten und digitalen photogrammetrischen Bildern. – Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG), 2/2002: 103-110.
- WROBEL, B.P., 1987: Digitale Bildzuordnung durch Facetten mit Hilfe von Objektraummodellen. – Bildmessung und Luftbildwesen (BuL), 55(3): 93-101.
- WROBEL, B.P., KAISER, B., HAUSLADEN, J., 1992. Adaptive Regularization – A New Method for Stabilization of Surface Reconstruction from Images. The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS), Washington, XXIX(B3): 824-831.

Konzept zur Automatischen Texturierung von Gebäudemodellen mit Thermographiebildern

LUDWIG HOEGNER¹, HOLGER KUMKE², LIQIU MENG³ & UWE STILLA⁴

Zusammenfassung: Die vorgestellte Arbeit zeigt ein Konzept, mit dem basierend auf einem vorhandenen 3D-Gebäudemodell Thermographiebilder ausgewertet werden. Dabei werden die Oberflächen des Modells mit den Thermographiebildern texturiert. Dazu müssen die äußere Orientierung des Kamerasystems genau bestimmt und Kombinationen von niedrig aufgelösten Teiltexturen zu vollständigen Fassadentexturen zusammengesetzt werden. Die so aufbereiteten objektbezogenen 3D-Thermographie-daten sollen in einer weiteren Stufe in einer Datenbank unter thermischen Gesichtspunkten ausgewertet werden.

1 Einleitung

Thermale Bilddaten werden heute in unterschiedlichen Maßstäben und für die verschiedensten Anwendungszwecke eingesetzt. Satellitenbilder dienen z. B. zur Erkennung von Brandherden (STEGERT et al., 2004), Vegetation (QUATTROCHI & LUVALL., 1999) oder zur Detektion von urbanen Wärmeinseln (LO & QUATTROCHI, 2003). Luftgetragene Infrarot-Systeme werden z.B. zur Detektion von Fahrzeugen (STILLA & MICHAELSEN, 2002; HINZ & STILLA, 2005) und zur Untersuchung von Leckagen in Fernwärmeleitungsnetzen (GEBNER & KRICKAU, 2005) eingesetzt. Thermale Kameras am Boden nehmen z.B. die Fassadenabstrahlung von Bauwerken auf (KLINGERT, 2005), um mit ihnen das Wärmeverhalten von Gebäuden für Wärmepässe bestimmen zu können.

IR-Gebäudedaten werden zumeist zeitaufwändig von einzelnen Standorten aufgenommen und visuell ausgewertet, ohne, dass dabei direkt einen Raumbezug hergestellt wird. Infrarotkameras haben jedoch eine relativ geringe Auflösung und einen kleinen Öffnungswinkel, wodurch das Sichtfeld einer Aufnahme sehr begrenzt ist. Größere Objekte müssen daher in mehreren Einzelbildern ausgewertet werden. Ziel der Arbeit ist es, die Flächen von vorhandenen 3D-Gebäudemodellen automatisch mit den aus Infrarot-Kameras gewonnenen Daten zu texturieren.

2 Konzeption

Eine Übersicht zum Konzept der automatischen Texturierung von Gebäudemodellen ist in Abb. 1 dargestellt. Es wird davon ausgegangen, dass als Eingangsdaten Thermographiebilder, die äußere Kameraorientierung und ein 3D-Gebäudemodell zu Verfügung stehen.

¹ Ludwig Hoegner, Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München, e-mail: Ludwig.Hoegner@bv.tum.de

² Holger Kumke, Lehrstuhl für Kartographie, Technische Universität München, Arcisstr. 21 80333 München, e-mail: Holger.Kumke@bv.tum.de

³ Prof.Dr.-Ing. Liqiu Meng, Lehrstuhl für Kartographie, Technische Universität München, Arcisstr. 21 80333 München, e-mail: liqiu.meng@bv.tum.de

⁴ Prof.Dr.-Ing. Uwe Stilla, Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München, e-mail: stilla@bv.tum.de

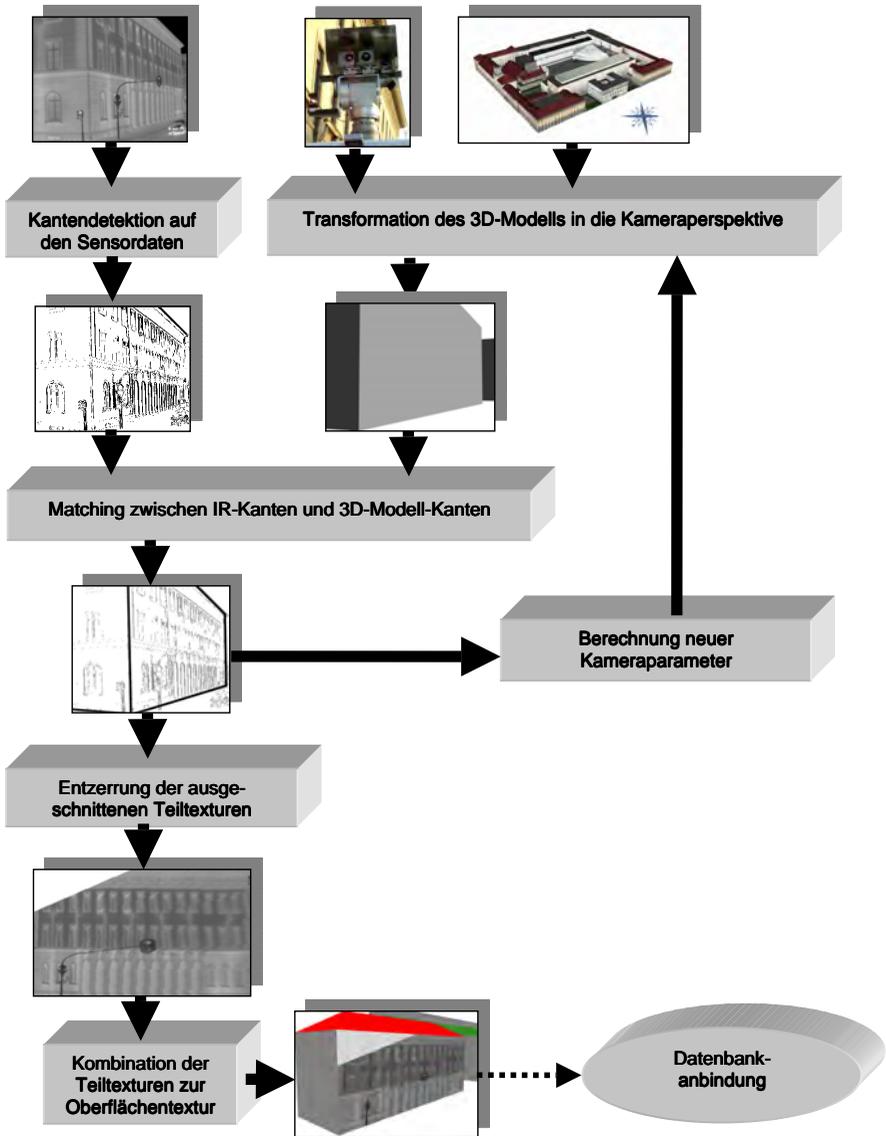


Abb. 1: Schema zur automatischen Texturierung von Gebäudemodellen mit Thermographiebildern

Für die Verarbeitung ist zunächst ein 3D-Modell des zu texturierenden Gebäudes notwendig. Vorteilhaft ist es, wenn die Modelle in Landeskoordinaten, wie z.B. Gauss-Krüger-Koordinaten vorliegen. Aus den Parametern der Kamera kann eine virtuelle Kamera konstruiert werden, die das Gittermodell des Gebäudes aus Sicht der Aufnahme zeigt. Dabei sind Oberflächenverdeckungen zu berücksichtigen, z.B. durch Z-Puffer- oder Hidden-Surface-

Verfahren.

Auf jeder Aufnahme ist eine Kantendetektion durchzuführen. Das Gittermodell wird in das Bildkoordinatensystem projiziert. Anschließend findet ein Matching zwischen den Kanten des IR-Bildes und des projizierten Gittermodell statt. Es wird davon ausgegangen, dass durch die gemessenen Kameraparameter (Position) der Suchraum für das Matching klein gehalten werden kann. Aus dem Matching sind die neuen Kameraparameter zu bestimmen, die für eine genauere Projektion des Gittermodells in den Bildraum verwendet werden.

Nachdem die zu einer sichtbaren Oberfläche zugehörige Textur ausgeschnitten ist, kann sie entzerrt werden. Dazu werden die Pixelkoordinaten der Aufnahmen in Texturkoordinaten der Oberflächen umgewandelt und als Liste gespeichert. Zusätzlich kann nun aus den Texturkoordinaten und dem Gebäudemodell die Auflösung für jede Texturcoordinate in Pixel pro Meter bestimmt werden. Die Schrägsicht der Aufnahme führt jetzt dazu, dass der Nahbereich zwar eine relativ gute Auflösung aufweist jedoch nur einen kleinen Teil des Objektes zeigt. Der Fernbereich ist niedriger aufgelöst und zeigt dafür einen größeren Objektausschnitt.

Durch die Umwandlung der Pixelkoordinaten in Texturkoordinaten können nun Teiltexturen einer Oberfläche aus verschiedenen Bildern zu einer einzigen Oberflächentextur kombiniert werden. Die gewonnenen Texturen werden anschließend zusammen mit dem 3D-Modell einer Datenbank übergeben und von dort aus für eine weitere Auswertung zur Verfügung gestellt werden zu können.

3 Vorstellung des Testgebietes

Beim praktischen Einsatz in besiedelten Gebieten treten Einschränkungen bei der Aufnahme auf. Diese betreffen die durch die enge Bebauung in Stadtgebieten eingeschränkten Sichtfelder und auftretenden Verdeckungen und die Problematik einer ausreichend genauen Positions- und Orientierungsbestimmung. In Straßenschluchten sind häufig nicht ausreichend viele GPS-Satelliten für eine korrekte Positionsbestimmung sichtbar.

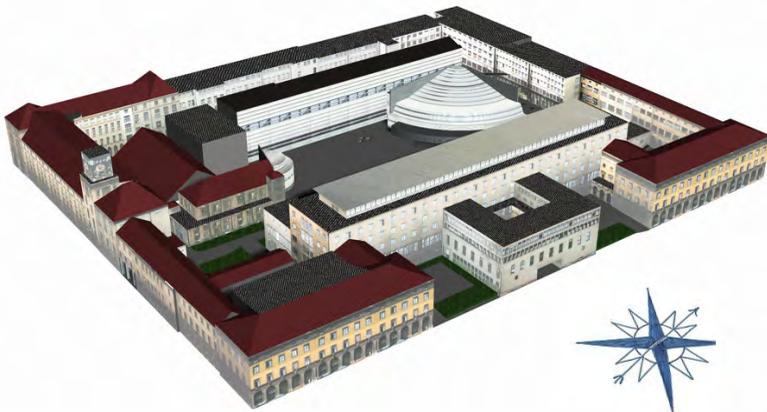


Abb. 2: 3D-Modell des TUM-Hauptgebäudes

Als Testgebiet haben wird das Quartier um das Hauptgebäude der Technischen Universität München (TUM) gewählt. Das TUM Hauptgebäude besteht aus verschiedenen Bauabschnitten aus lang gezogenen geraden Fassaden und verwinkelten Fassaden mit zwei zurückversetzten Gebäudeteilen an der Ostseite. Abb. 2 zeigt einen Teil des Testgebietes als 3D-Modell. Die an drei Seiten enge Bebauung erlaubt nur einen geringen Abstand zur Aufnahme der Fassade. Solch eine Situation ist typisch für innerstädtische Bereiche.

4 Erfassung von Thermographiebildern



Abb. 3: Messaufbau: v.l.: Prisma, SC3000 Thermal IR Kamera, MerlinMID Mittel IR Kamera, Videokamera

Die im Vergleich zum sichtbaren Licht größeren Wellenlängen erfordern den Einsatz anderer Optiken und Sensoren. Baulich bedingt erreichen die IR-Kameras nicht die Auflösung von photogrammetrischen Digitalkameras, noch von normalen Digitalkameras. So besitzen z.B. die beiden eingesetzten IR-Kamerasysteme (Abb. 3) eine Auflösung von 320x240 Pixel (FLIR SC3000) bzw. 320x256 Pixel (MerlinMID) und einen Öffnungswinkel von nur 20°. Die SC3000 nimmt im thermalen Infrarot (8 - 12 μm) auf, die MerlinMID nimmt im mittleren Infrarot (3 - 5 μm) auf. Abb. 3 zeigt den Messaufbau auf einem Fahrzeug mit den beiden IR Kameras, sowie einer Videokamera und einem Prisma für die Positionsbestimmung. Der Messaufbau ist auf einem Schwenkneigekopf angebracht, der einen Wechsel der Blickrichtung erlaubt.

Ähnlich wie im sichtbaren Bereich hat die Sonne auch einen Einfluss auf Infrarotaufnahmen. Aufnahmen im mittleren Infrarotbereich werden direkt vom Sonnenlicht beeinflusst. Wir sehen auf den Fassaden neben ihrer Eigenstrahlung auch die Reflexion des Sonnenlichts. Im thermalen (langwelligeren) Infrarot äußert sich der Einfluss der Sonne nur indirekt, da sie in diesem Bereich selber keine Strahlung aussendet. Da sie jedoch die Oberflächen, die sie beleuchtet erwärmt, strahlen die von der Sonne beschienenen Flächen stärker als jene im Schatten. Auch die Umgebungstemperatur beeinflusst das Erscheinungsbild von Fassaden.

Günstige Zeitpunkte für Aufnahmen liegen nach Sonnenuntergang und vor Sonnenaufgang um den direkten Einfluss der Sonne zu eliminieren. Zur Verminderung der Verdeckung von Fassaden durch Bäume wurde die Zeit vor der Belaubung im Frühjahr gewählt.

Auf Grund des geringen Sichtfelds der Kameras und des geringen Abstands zum Gebäude mussten die Aufnahmen in Schrägsicht durchgeführt werden, um die Fassaden in voller Höhe aufnehmen zu können. Die Aufnahmen wurden mit 50 Bildern pro Sekunde durchgeführt. Um die aus der Schrägsicht entstehende Eigenverdeckung der Objekte zumindest teilweise ausgleichen zu können, wurden pro Fassade zwei Fahrten unternommen, eine Fahrt mit Sicht nach schräg vorne und eine Fahrt mit Sicht nach schräg hinten. Dabei blieben die Einstellungen des Schwenkneigekopfes während einer Messfahrt konstant, sodass lediglich die Position der Kameras bei der Vorbeifahrt aufgezeichnet wurde. Dazu kamen zwei Messverfahren zur Bestimmung der Trajektorien zum Einsatz. Zum ersten die Bestimmung über GPS-Koordinaten, zum anderen die Bestimmung mittels fortlaufender Tachymetermessung von eingemessenen Fixpunkten aus. Dabei dient letzteres Verfahren auf Grund seiner entschieden höheren

Genauigkeit zunächst als Basis.

Die mit einer thermalen Auflösung von 14bit aufgenommenen Bilder werden als 16bit Integer Werte gespeichert. Eine Umwandlung in visualisierte Bilddaten (256 Graustufen) erfolgt nur für die Darstellung am Monitor. Die einzelnen Aufzeichnungen der 3 Kameras und der beiden Positionsbestimmungen sind über Zeitcode abgeglichen, sodass sie synchronisiert werden können.

5 Verarbeitung der Messdaten

In diesem Kapitel wird anhand eines Beispiels aus der aktuellen Messkampagne das zweistufige Verfahren zur Gewinnung der Texturen für eine Oberfläche des 3D-Modells erläutert.

5.1 Erzeugung der Teiltexturen

Abbildung 4 zeigt eine Visualisierung der 16bit Bilder als 8bit Grauwertbild. Deutlich zu erkennen ist neben der Hausecke in der Bildmitte der dunkle Himmel und die scharfe Abgrenzung zwischen Himmel und äußerem Dachfirst. Die hintere Hauswand am rechten Bildrand tritt kaum, die Bodenkante gar nicht in Erscheinung, da dort die Steinfassade in den Plattenweg übergeht. Abbildung 5 zeigt dieselbe Szene nach der Kantendetektion. Neben der erwarteten vorderen Hauskante und der vorderen Dachfirstkante ist auch zumindest im oberen Teil die hintere Hauskante zu sehen, die Bodenkante fehlt fast ganz. Da Gebäudemodelle üblicherweise die innere Dachkante als Ende der Fassade definieren, kann es hier zu Problemen bei der korrekten Positionierung der Textur kommen. Für das Matching stehen hier also drei Kanten zur Verfügung.

Außerdem treten eine Reihe von Fenster- und Türenkanten auf. Diese Kanten sind in zwei aufeinander folgenden Aufnahmen sehr stabil und besitzen eine relativ geringe Bewegung durch das Bild, die vom rechten zum linken Bildrand stetig zunimmt.

Die Bewegungsgeschwindigkeit bzw. Bildwanderung zwischen aufeinander folgenden Aufnahmen ist aufgrund der hohen Aufnahmefrequenz bezogen auf die Bildgröße gering. Aufgrund der bei den Experimenten annähernd konstant gehaltenen Geschwindigkeit kann die



Abbildung 4: IR Aufnahme Süd-Ostfassade Hauptgebäude



Abbildung 5: Kanten von Abb. 4

Position einer Kante in einem Bild für das nachfolgende Bild gut geschätzt werden. Der dabei gemachte Fehler soll für die nächste Suche in die Schätzung mit eingehen. Liegen nicht genügend Modellkanten für einen Match vor, dann können Bilder aufgrund vorangegangener Bilder über ihre sonstigen Objektkanten positioniert werden. Weiterhin erlaubt eine Zuordnung von Bildern eine Interpolation der Kameraorientierungen für Bilder ohne gemessene Kameraorientierung. Während die Kameraposition pro Sekunde etwa 1 bis 2 mal ermittelt wird, werden pro Sekunde 50 Bilder aufgenommen.

Im Anschluss an das Matching erfolgen die Entzerrung der Aufnahme und die Umwandlung der Messwerte in Texturkoordinaten. Abbildung 6 zeigt ein Beispiel für eine entzerrte Textur der Frontfassade aus derselben Aufnahme. Man sieht deutlich, wie die Bildqualität von links nach rechts auf Grund der perspektivischen Verzerrung abnimmt. Im linken oberen Bereich sieht man eine Lücke, die außerhalb des Sichtfelds dieser Aufnahme liegt.

5.2 Kombination der Teilt Texturen

Zu Kombination von Teilt Texturen können zwei verschiedene Vorgehensweisen unterschieden werden.

Im ersten Verfahren werden Aufnahmen wie in unserem Testszenario aus einem Fahrzeug fortlaufend aufgenommen. So sind durch die Schrägsicht und die Aufnahmereihenfolge festgelegt, welche Teilt texture in welchem Bereich der Oberfläche die höchste Auflösung hat. Legt man diese Teilt texturen dann der Reihe nach übereinander, wird die gesamte Texturinformation für die Erzeugung der fertigen Oberflächentextur verwendet.

Das zweite, allgemeine Verfahren verwendet die für jede Teilt texture gespeicherten Randauflösungen. Dabei werden für jede mit einem Wert zu besetzte Texturcoordinate aus den an dieser Stelle vorhandenen n hoch aufgelösten Texturen die interpolierten Werte verwendet, die nach ihrer Genauigkeit, sprich Auflösung an der entsprechenden Stelle, in das Ergebnis eingehen. Dieses Verfahren erlaubt die Berechnung einer Oberflächentextur aus beliebigen Teilmengen von gespeicherten Thermographiebildern. So können Ergebnisse verschiedener Messkampagnen kombiniert werden. Grob aufgelöste, flächendeckend erfasste Texturen aus Luftaufnahmen können für einzelne Gebäudemodelle um hoch aufgelöste Texturen aus Bodenaufnahmen ergänzt werden.

Für die Kombination der Teilt texturen soll zunächst auf das erste beschriebene Verfahren zurückgegriffen werden. Ein Beispiel ist in Abbildung 7 zu sehen. Die nicht texturierte linke obere Ecke war in keiner der für die Texturierung ausgewählten Aufnahmen enthalten und bleibt daher frei.

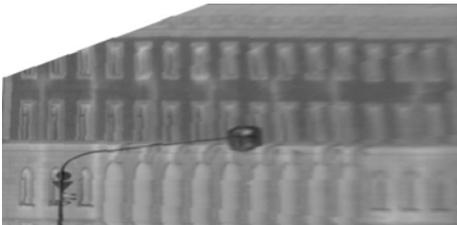


Abb. 6: Entzerrte Textur der Frontseite

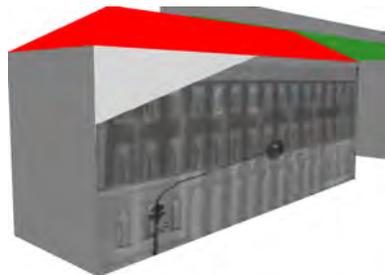


Abb. 7: Projizierte Fassade im Gebäudemodell

6 Diskussion

Die aus den Messwerten extrahierte Dachfirstkante entspricht nicht immer der Dachfirstkante des Gebäudemodells. Dies hat mit der Konstruktion der 3D-Modelle zu tun. Während die Kantenextraktion auf Grund des hohen Kontrasts zwischen Gebäude und Himmel mit Blick von unten die vordere Kante sieht, die Kante zwischen Mauer und Dachunterseite auf Grund der ähnlichen Temperatur aber nicht, ist es im Gebäudemodell so, dass die Fassade entweder aus Lasermessungen ohne Dachüberstand erzeugt wird, also nur die innere Dachfirstkante aufweist, oder aus Luftbilder rekonstruiert wird, in denen dann zwar die äußere Dachfirstkante vorkommt, aber dafür die innere nicht, weil die Fassaden von der vorderen Kante zum Boden gezogen werden. In beiden Fällen wird bei der Überlagerung der Kanten aus dem Gebäudemodell und den Messwerten die sichtbare Unterseite des Daches zwischen innerer und äußerer Firstkante fälschlicherweise der Mauer zugeschlagen. Dadurch ergibt sich in der Fassadentextur eine Stauchung in der Höhe.

Das vorgestellte Verfahren verwendet zunächst für die Bestimmung der Kameraposition die eingemessenen Trajektorien. Diese Methode ist zwar entschieden genauer als die Bestimmung durch GPS, aber auch entschieden aufwändiger. Die relativ groben und gerade im dicht bebauten Stadtmfeld nicht immer korrekten GPS Daten erfordern eine ein robustes Matching.

Ein nächster Schritt ist die Behandlung von Eigen- und von Fremd-Verdeckungen. Durch Eigenverdeckung unvollständige aufgenommene Texturen sollen automatisch aus Aufnahmen aus andern Blickwinkeln (vorwärts und rückwärts blickende Kamera) vervollständigt werden. Bei Fremdverdeckung durch z.B. Ampeln (siehe Abb. 4 – 6) soll der Störkörper detektiert und eliminiert werden. Die mit dem beschriebenen Verfahren extrahierten Teilt Texturen und die aus ihnen erzeugten Oberflächentexturen sollen zusammen mit dem 3D-Gebäudemodell in eine Datenbank eingespeist werden, um in weiteren Verarbeitungsschritten aus den Messwerten den Gebäudemodellen geometrische und thermale Eigenschaften hinzuzufügen zu können.

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.

Die Autoren danken FGAN-FOM Abteilung Optronische Systemanalyse, Ettlingen, für die Bereitstellung des Messfahrzeuges mit IR-Kameras und der Unterstützung bei der Messung.

7 Literaturverzeichnis

- SIEGERT F, ZHUKOV B, OERTEL D, LIMIN S, PAGE SE, RIELAY O, 2004. Peat fires detected by the BIRD satellite. *International Journal of Remote Sensing*, **25**(16): 3221 - 3230
- QUATTROCHI DA, LUVALL JC, 1999. Thermal infrared remote sensing for analysis of landscape ecological processes: methods and application. *Landscape Ecology*, **14**: 577-598
- LO CP & QUATTROCHI DA, 2003. Land-Use and Land-Cover Change, Urban Heat Island Phenomenon, and Health Implications: A Remote Sensing Approach. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **69**(9): 1053-1063
- HINZ S & STILLA U, 2005. Car detection in aerial thermal images by local and global evidence accumulation. *Pattern Recognition Letter*, **27** (2006): 308-315

- STILLA U & MICHAELSEN E, 2002. Detektion von Fahrzeugen in Videosequenzen von luftgetragenen thermischen Kameras. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation VGI, **90**(3+4): 79-86
- GEBNER & KRICKAU, 2005. Luftgestützte Thermografie von Fernwärmeleitungen, Präsentation 20./21.09.2005, Fernwärmekolloquium Dresden, http://www.envico-scandat.de/content/lectures/Praesentation%20Dresden_manuell.pdf (zuletzt besucht 23.06.06)
- KLINGERT M, 2005. Methoden der digitalen Bildverarbeitung in der Infrarotbauwerksthermografie. Forum Bauinformatik, BTU Cottbus, 287-294

Ein Beitrag zu den geometrischen Grundlagen der Geoinformatik

RALF DONNER¹

Zusammenfassung: Das Raumkonzept hat durch die Verwendung des metrisierten Raumbezuges als formales Ordnungselement und Bezugsgrundlage der Geodaten in der Geoinformatik eine grundlegende Bedeutung. Die konsequent empirische Bildung des Raumbegriffes setzt bei nicht-interpretierten Beobachtungen an. Raum ergibt sich dann als begriffliche Zusammenfassung nacheinander erfahrener Sinneserlebnisse. Als mathematische Struktur, die die Erfahrungen sachgemäß beschreibt, bietet sich die projektive Geometrie an. Die über die projektive Geometrie hinausgehenden Präzisierungen des Raumes sind danach zu differenzieren, ob sie die Konfiguration von Gegenständen so zusammenfassen, wie sie sich aus Messungen oder Tastwahrnehmungen oder aus perspektivischem, parallaxtischem oder stereoskopischem Entfernungssehen oder aus physikalisch-theoretischen Konstruktionen ergeben. Dadurch wird eine größere Freiheit in der Begriffsbildung erreicht.

1 Einleitung

Das Raumkonzept hat in der Geoinformatik eine mehrfache Bedeutung: Einerseits ist die räumliche Sichtweise ein generelles Konzept für das Verstehen in den verschiedenen geowissenschaftlichen Bereichen. Andererseits ist der Raumbezug ganz formell Ordnungselement und Bezugsgrundlage der Geoinformationen. H. COUCLÉLIS (1999) sieht die Geoinformatik herausgefordert, Informationssysteme zu schaffen, welche die nahtlose Integration von Raum und Zeit im NEWTONSchen Sinn, in relativen und nicht-metrischen Räumen und in mannigfaltigen Raum-Zeit-Perspektiven verwirklichen. Allerdings sieht sie die Grundsatzfrage nach den der Geoinformatik zugrunde liegenden Begriffen Raum und Zeit explizit als ungelöst und offen an. Sie überlässt es somit dem Verfasser, diese zentralen Begriffe zu entwickeln.

Insbesondere mit der Entwicklung der nicht-euklidischen Geometrien und mit EINSTEINS Relativitätstheorie ist deutlich geworden, dass die Geometrie eine gedankliche Interpretation der Erfahrung ist: „Die Begriffe [der geometrisch-physikalischen Theorie – d. Verf.] dienen dazu, eine Vielheit von wirklichen und gedachten sinnlichen Erlebnissen in gedanklichen Zusammenhang zu bringen.“ (EINSTEIN 1921) Ohne die von EINSTEIN vorgenommene Einschränkung stellt diese Aussage die Beziehung zwischen sinnlichen Erlebnissen und gedanklichen Zusammenhängen allgemeingültig dar. Nun sind – beispielsweise aus der Bildinterpretation (DONNER 2001) – folgende grundsätzliche Zusammenhänge zwischen der Erfahrung und der begrifflichen Interpretation bekannt:

- (1) Die reinen, noch nicht interpretierten Sinneserlebnisse sind zusammenhanglos. Die Verbindungen zwischen Ihnen sind gedanklich, wie gerade gesagt und in Abbildung 1 veranschaulicht.

¹ Technische Universität Bergakademie Freiberg - Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, Institut für Markscheidewesen und Geodäsie, Reiche Zeche, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Email: Ralf.Donner@tu-freiberg.de

- (2) Liegen nicht genügend Erfahrungen vor, kann ein und dieselbe Sinnesempfindung verschieden interpretiert werden, siehe Abbildung 2.
- (3) Mit weiteren Beobachtungen kann die Mehrdeutigkeit aufgelöst werden.
- (4) Die Sinneserlebnisse haben den Charakter von Fakten.

Durch die Unterscheidung der Sinnesempfindungen, beispielsweise hell-dunkel und Anordnung in Abbildung 2, von gedanklichen Interpretationen können Freiheitsgrade in der Begriffsbildung bestimmt werden.

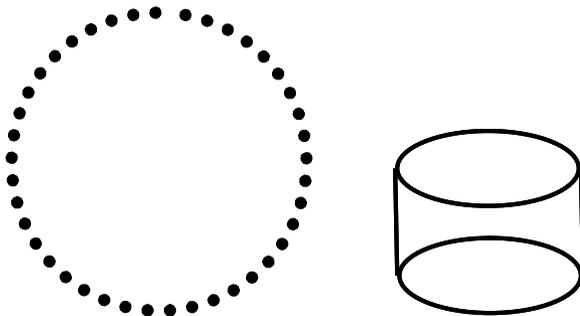


Abbildung 1 Der gedachte Kreis: Der Begriff des Kreises lässt einen Kreis erkennen, wo physikalisch nur Punkte sind, linkes Bild.

Abbildung 2 Mehrdeutigkeit der Interpretation: In Umkehrbildern, hier: WUNDTs „Serviettenring“, kann ein und dieselbe Vorlage verschieden interpretiert werden. Auch wenn im Alltag nahezu immer aus dem Kontext genug Informationen zur Auflösung von Mehrdeutigkeiten führen, ist Mehrdeutigkeit nicht nur ein optisches Phänomen.

EINSTEIN (1916) nannte die Vorstellung von Raum als einen Behälter in welchem die Körper angeordnet sind, vorwissenschaftlich (S. 90) und forderte eine größere Beweglichkeit in der Bildung des Raumbegriffes (S. 91). Damit provoziert er die Frage, worin sich die Raumauffassung der Geodäten und Photogrammeter denn von jener vorwissenschaftlichen unterscheidet. Die Beantwortung besteht aus zwei Teilen: Einem, der eine geeignete Untersuchungsmethode bestimmt und einem zweiten, in dem die Methode durchgeführt und die Ergebnisse vorgestellt werden.

2 Die Wahl der Untersuchungsmethode

Jeder kennt Beispiele sogenannter Sinnestäuschungen: Geraden, Parallele, Quadrate oder Kreise werden als etwas anderes angesehen, als was sie sich durch eine Messung ergeben (Beispiele in Abbildung 3). Ein und dasselbe Bild kann unterschiedlich interpretiert werden (Abbildung 2). Beide in ein Bad getauchten Hände fühlen sich unterschiedlich an, je nachdem, ob sie zuvor in warmem oder kaltem Wasser waren usw.

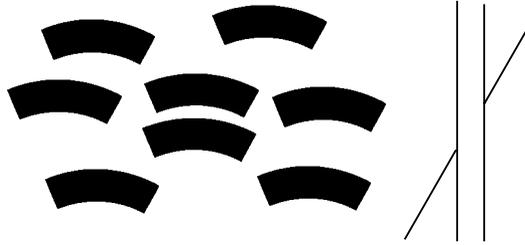


Abbildung 3 Sogenannte optische Täuschungen: Die Größe der Bogenstücke im linken Bild wird unterschiedlich beurteilt, je nachdem ob das mittlere Paar allein (die anderen Bogenstücke sind abgedeckt) oder im Ensemble betrachtet wird. Im rechten Bild erscheint das rechte Geradenstück gegenüber dem linken Teil derselben Gerade versetzt (POGGENDORFFSche Täuschung, 1865).

Schützt die Berufung auf Messungen vor Fehlinterpretationen? Schauen wir auf eines der wichtigsten Experimente der Wissenschaftsgeschichte, das Experiment von MICHELSON und MORLEY mit dem über das Vorhandensein eines absoluten Raumes, wie ihn neben anderen NEWTON postuliert hatte, entschieden werden sollte. Der Physiker LORENTZ hatte 1904 das Experiment ganz im Sinne eines absoluten Raumes gedeutet. Doch der MICHELSON-MORLEY-Versuch wurde auch zum Ausgangspunkt für die Entwicklung der Relativitätstheorie, da A. EINSTEIN ihn in völlig verschiedener Richtung deutete, die mit der Annahme eines absoluten Raumes unvereinbar ist. Beide Deutungen geben eine vollständige Erklärung aller Beobachtungen, die zu Beginn des 20. Jahrhunderts bekannt waren. (JAMMER 1980, S. 160) Das heißt: Allein die Berufung auf Messungen hebt nicht das durch eine ungenügende Vielfalt der Beobachtungen hervorgerufene Problem mehrdeutiger Interpretationsmöglichkeiten auf.

Bei der Bestimmung der Eigenschaften des Raumes tritt noch eine andere Schwierigkeit auf: Um etwas messen zu können, muss das zu messende aus dem amorphen Kontinuum bereits gedanklich isoliert worden sein. Damit basieren Messungen wie auch die zu ihnen gehörenden physikalischen Phänomene bereits auf begrifflich gedeuteten Erlebnisinhalten, wie u. a. A. EINSTEIN, K. POPPER und T. KUHN treffend bemerkt haben. (TARNAS 1991, S. 493 f.) Die Natur- und Technikwissenschaften beschreiben die Phänomene als Ereignisse in Raum und Zeit. Mit der Einordnung des physikalischen Geschehens in ein raumzeitliches Bezugssystem, erfüllt dieses eine Behälterfunktion (SCHNEIDER 1988, S. 40) Das heißt: Der geometrischen Bestimmung des Raumes mit Messungen geht immer schon die Anwendung eines Raumbegriffes voraus (vgl. dazu auch EINSTEIN 1916, S. 91). Zur Vermeidung dieses gedanklichen Zirkels soll die Bestimmung der geometrischen Eigenschaften des Raumes hier von interpretationsfreien Beobachtungen ausgegangen werden.

Diese Eigenart, einen Begriff zugrunde zu legen, dessen Merkmale erst noch bestimmt werden ist nicht nur gängige Praxis der Wissenschaftsstrategie von Hypothese und Verifizierung, sondern spiegelt sich auch im Unvermögen einer Wissenschaft wieder, die ihr zugrunde liegenden Begriffe mit ihren eigenen Mitteln zu klären. Eine voraussetzungsfreie Untersuchung kann ihren Ausgangspunkt nur bei noch nicht interpretierten Beobachtungen nehmen. Diese Wahl des Ausgangspunktes ist die strenge Erfüllung eines Maßstabes neuzeitlicher Wissenschaft, welche bekanntlich auf Erfahrungen, nicht auf Gedankeninhalten zu beruhen hat.

3 Empirische Grundlagen des Wissens vom Raum

Weder kann der Mensch wahrnehmen, ohne seine Erlebnisse gedanklich zu fassen und zu ordnen, noch sind die bei der Beobachtung erfahrenen Sinneserlebnisse rein subjektiv, vom Gegenstand abgespalten. Wahrnehmung realisiert sich als Einheit von Wahrnehmendem und Wahrgenommenen. Jedoch nicht in allen Bereichen der Wahrnehmung hat das Denken eine dominierende Rolle (ZAJONC 1980, SCHEURLE 1984). Daher untergliedere ich für die weitere Betrachtung die Wahrnehmung, die als Oberbegriff alles wahrnehmend Gegebene auf einen gemeinsamen Nenner bringt, in Sinnes-*Erkennen* und Sinnes-*Empfinden*. Ein Beispiel für eine Sinnesempfindung, die andernorts auch „Perzeption“ oder „Affekt“ genannt wird und von der Vorstellung einer Empfindung streng zu unterscheiden ist, ist das Erleben des Himmelsblaus in seiner Mischung von Blau und Weiß, in seinem Changieren von Transparenz und Undurchsichtigkeit, in seinem konturlosen Übergehen von Hell zu Mittel- oder Dunkelblau. „Sinnesempfindung“ bezeichnet also das deutliche Erleben einer Sinnesqualität. Die durch unmittelbare Sinnesempfindung gewonnenen Qualitäten unterliegen keiner variablen begrifflichen Deutung oder Wertung. Sie sind reine *Erlebnisse*. Für eine empfundene Qualität ist charakteristisch „daß es keine ausschlaggebende Rolle spielt, welchem Erkenntniszusammenhang sie angehört. [...] Die spezifische Qualität bleibt unabhängig davon, ob wir die Empfindung Blau dem Anblick des heiteren Himmels über uns oder dem physischen Nachbild der Farbe Orange zuordneten.“ (SCHEURLE 1984, S. 55) Frei von jeder Interpretation und jeder Theorie kann den Sinneserlebnissen die Bedeutung eines absoluten Elementes beigegeben werden. Das erlebte Blau ist eine ganz bestimmte Erfahrung, die so ist, wie sie ist. Anders verhält es sich mit ihrer begrifflichen Bestimmung im Wahrnehmungsurteil: Sie kann mehrdeutig oder unzutreffend sein.

Schaut man sich die Beispiele sogenannter Sinnestäuschungen nochmals an, ergibt sich folgendes: Im Umkehrbild Abbildung 2 sind die dunklen Linien und hellen Flächen in einer bestimmten Weise angeordnet. „Hell“, „dunkel“ und „Anordnung“ bezeichnen bestimmte Sinnesempfindungen. Ihre Erlebnisqualitäten sind keine Frage der Interpretation. Daher werden die noch nicht gedanklich bestimmten Sinnesempfindungen als Ausgangspunkt der Untersuchung gewählt.

Gliedert man das Wahrnehmungsfeld in Bereiche unähnlicher und unabhängiger Erlebnisqualitäten, gelangt man zu einer Vielfalt einzigartiger, in sich differenzierbarer Sinnesbereiche: Man hört verschiedene Töne, sieht verschiedene Farben, erlebt verschiedene Bewegungen, Richtungen usw. Spätestens nach einiger Übung können Sinneserlebnisse trotz ihrer letztlich immer vorhandenen Synästhesien (LUTZKER 1996, S. 20) durch das Ausrichten der Aufmerksamkeit deutlich von gedanklichen Elementen unterschieden werden, wie auch unterschieden werden kann, ob das Sinneserlebnis auf das eigene Wohlbefinden (Sympathie, Unlust, Schmerz, Heiterkeit) oder auf das Hören, Sehen, Riechen, Tasten eines Gegenübers zurückzuführen ist.

Zu den reinen Sinnesempfindungen gehören auch die beim Betrachten von Abbildung 4 erfahrenen Bewegungsqualitäten. Sie bezeichnen wir als „gleichmäßig rund“ beziehungsweise als „gerade“. Von besonderer Bedeutung für die hier in Rede stehenden Fragen ist neben dem Bewegungssinn der Gleichgewichts- oder Richtungssinn: Neben den Empfindungen der Vertikalen im Aufrichten, der Schweben im Gleichgewicht zwischen Steigen und Fallen können mit ihm, wie im begrenzten Ausschnitt mit dem Sehsinn, Richtungen unmittelbar wahrgenommen werden. Die Richtungsempfindungen korrespondieren mit der Eigenschaft des Ausgedehntseins ruhender oder bewegter Objekte und ihr Zusammenwirken mit dem Bewegungssinn ermöglicht die sinnliche Erfahrung der Grundelemente der Geometrie. Ob etwas gerade ist, erfahren wir aus der Art der Bewegung z. B. der Augen. Unterschiedliche Orte

erfahren wird aus den Empfindungen der Richtungen zu ihnen. Das Erleben von Bewegungen und von Richtungen bildet die sinnliche Grundlage der Axiome der Geometrie: Die Form erleben wir durch die Bewegung, die Richtung zu einem Punkt mit dem Gleichgewichtssinn und seinen Korrespondenzen zum Seh-, Tast- oder Hörsinn. (Ausführlich siehe SCHEURLE 1984, S. 109 ff.)

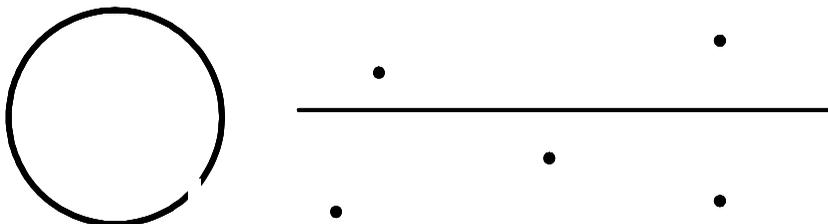


Abbildung 4 Sinnliche Erfahrung geometrischer Axiome. Beim Betrachten erlebt man bestimmte Bewegungsqualitäten: Die gleichmäßige Rundung oder die Gerade. Die Erfahrung verschiedener Richtungen erfolgt mit dem Richtungssinn oder innerhalb des Sehfeldes mit dem Sehsinn: Die Punkte werden in verschiedenen Richtungen erlebt.

4 Die Bildung des Raumes

Raum ist nicht in der gleichen Weise empfindbar wie Helle, Wärme, Härte oder andere Sinnesqualitäten. „Raum“ (und auch „Zeit“) sind keine Bezeichnungen für Sinneserlebnisse. Das Wort Raum verweist auf eine gedankliche Ordnung erfahrener Sinneserlebnisse nach ihren Richtungen. Geradezu typisch ist das Zusammenfassen von nacheinander erfahrenen Erlebnissen zu *einem* Raum. Insofern bezeichnet „Raum“ eine Interpretation nacheinander erfahrener Erlebnisse als gleichzeitig zu einem Raum gehörige: Bewege ich mich beispielsweise von A nach B zu Fuß oder mit den Augen bin ich frei, die Reise als ein ganz konkretes Bewegungserlebnis mit spezifischen Qualitäten zu empfinden. Unter bestimmten Umständen kann die erlebte Bewegung aber auch als Weglänge gedeutet werden. Ganz so, wie das Nacheinander von Blitz und Donner als Distanz interpretiert werden kann. Es ist bedeutungsvoll, dass auch die Erlebnisse anderer Sinnesfelder, insbesondere die Empfindungen des Richtungssinnes, des Seh-, des Hör- und des Tastsinnes in die Konstruktion des Raumes einbezogen werden.

Unter welchen Umständen kann ein Prozess als Raum gedeutet werden? Dazu erinnern wir uns zuerst daran, dass der Gedanke (Synonyme: Begriff, Idee, Theorie, Modell) die zusammenhangslosen Empfindungen verbindet, siehe Abbildung 1. Er tut dies so, dass die Beobachtungen als aus ihm hervorgegangen gedacht werden können. Nehmen wir ein Beispiel: Geht man um einen Tisch, lassen sich die verschiedenen Sichten auf ihn als Perspektivabbildungen des Tisches systematisieren. Noch deutlicher: Die erlebten Farben und Helligkeiten, die synchron erlebte Bewegung, die Empfindungen des Gleichgewichts-, des Geruchs-, des Hör-, des Wärme- und des Tastsinnes lassen sich durch die Deutung als „Tisch“ verständlich ordnen. Die Zuordnung des Begriffes „Tisch“ ist nicht willkürlich, wie Abbildung 1 nicht als Dreieck interpretiert werden kann. Der Begriff „Raum“ ist nun (im Vergleich zum Begriff „Tisch“) „ein sehr allgemeines Konzept für das Verstehen und Ordnen der Umwelt im täglichen Leben, in der Kunst und in der Wissenschaft“ (KOCH 2002). Aber trotz seiner Universalität passt er nicht für alle Erlebnisse: Es kann sehr genau unterschieden werden, ob Erlebnis-

se als gleichzeitige gedeutet werden können oder nicht. Letzteres ist beispielsweise dann der Fall, wenn ein Ding als veränderlich erfahren wird.

Die Gleichzeitigkeit hat für die Interpretation der Erlebnisse als räumliche eine herausragende Bedeutung. Das kann an folgendem veranschaulicht werden: Man sieht ein Fahrzeug auf einer entfernten Straße: Wenn man nicht konzentriert auf die Bewegung achtet, fällt erst nach einer gewissen Zeit auf, dass das Fahrzeug an einer anderen Stelle wahrgenommen wird, woraus dessen Fortbewegung gefolgert wird. Erst in der jüngeren Vergangenheit entwickelte sich in der Wahrnehmungspsychologie der Konsens, dass Bewegung nichts Konstruiertes ist, sondern unmittelbar erlebt werden kann (KEBECK 1994, S. 301 unter Bezug auf GIBSON), wenn man darauf achtet. Tut man dies nicht, tritt das Leben als Folge diskreter Momente in das Bewusstsein oder aus der Erinnerung, weil es zur Gewohnheit geworden ist, nacheinander erfahrene Erlebnisse unter dem Aspekt des Nebeneinanders zeitlich zu diskreten, d. h. zu Momenten zusammenzufassen. Damit fasst der Raumbegriff Ereignisse durch zeitliche Diskretisierung zusammen, wie der Begriff des Kreises die Punkte in Abbildung 1 oder der Begriff des Tisches in Verbindung mit dem Begriff der optischen Täuschung die verschiedenen Sichten auf den Tisch zusammenfasst.

5 Zur Geometrie des Raumes

Mit der Raumbildung einher geht die Gliederung der amorphen Sinneserfahrungen in zusammenhängende und voneinander unterscheidbare Flächen und Kanten sowie deren Zusammensetzung zu dreidimensionalen Körpern. Die Anordnung im Raum wird objektseitig vor allem durch die zu den Sinnesempfindungen gehörenden Richtungen, die Bewegungen zwischen ihnen sowie durch den erlebten Synchronismus der Ereignisse der verschiedenen Sinnesfelder bestimmt. Grundsätzliche Denkfunktionen wie Grenzziehung zwischen sich und einem Gegenüber, das Differenzieren, das Polarisieren, die Auswahl, Hervorhebung und immer wieder die Identifikation von Ähnlichem übernehmen in der die Sinnesempfindungen zusammenfassenden Bildung von Körpern und Prozessen wichtige Funktionen wie vielfältige Experimente, zuvörderst aus dem Bereich der Gestaltpsychologie, zeigen. Raum entsteht (erst) mit der Interpretation der Sinnesempfindungen als Körper und Prozesse. Die Bildung von Körpern aus den unmittelbar gegebenen Sinnesempfindungen kann man in zunächst unübersichtlichen Situationen an sich selbst beobachten. Beispielsweise beim Erwachen am Morgen in ungewohnter Umgebung oder bei der Betrachtung geeigneter Kunstwerke wie „*Der Blick auf einen Seitenkanal des Arsenal*“ von J. M. W. TURNER (um 1840). Die gewohnheitsmäßige Vergegenständlichung ist der Hintergrund für die oben vertretene Aussage, dass Natur- und Technikwissenschaften immer schon gedankliche Interpretationen der unmittelbaren Erfahrungen voraus gehen.

Für die Interpretation der Sinneserlebnisse als Körper und Prozesse im Raum ist die Gleichzeitigkeit von fundamentaler Bedeutung, wie bereits ausgeführt wurde. Dabei ist allerdings nicht zu erkennen, dass die Ausbreitung von Änderungen des Lichtes im Vakuum, kurz Lichtgeschwindigkeit oder c genannt, eine besondere Rolle spielen würde. Sicherlich, „Das Phänomen der Lichtausbreitung ordnet im leeren Raum jedem Lokal-Zeit-Intervall eine Strecke, nämlich den zugehörigen Lichtweg, zu und umgekehrt.“ (EINSTEIN 1921) Aber auch jede andere Bewegung kann ebenso zur Konstruktion von Raum genutzt werden. Sind diese Bewegungen nicht leiblich-motorischer, sondern qualitativer Art (Zustandsänderungen), entstehen Merkmalsräume. Anders formuliert: Merkmalsunterschiede oder Bewegungsfortschritte können durch Zuweisung unterschiedlicher Orte unmittelbar wahrnehmbar gemacht werden,

da die unterschiedlichen Orte als Richtungen unmittelbar erfahren werden können. (Das ist bekanntlich das Grundprinzip der Visualisierung von Daten.)

Die auch von EINSTEIN (1921) angesprochene Frage nach der Endlichkeit oder Unendlichkeit des Raumes kann man in folgender Weise aus dieser konsequent-empirischen Perspektive betrachten: Raum ist dort, wo Sinneserlebnisse als Anschauungsraum oder physikalische Messwerte als physikalischer Raum interpretiert werden. Entscheidend für die Interpretation von Ereignissen als Ereignisse im Raum ist sowohl aufseiten des gemeinen Beobachters wie aufseiten des Physikers die jeweils zugrunde gelegte Gleichzeitigkeit. Über die Gleichzeitigkeit der Ereignisse wird der Raum strukturiert. (In der Physik werden äquivalente Ablesungen synchronisierter Uhren zur Definition der Gleichzeitigkeit verwendet, um aus bekannten Geschwindigkeiten und gemessenen Signallaufzeiten räumliche Größen zu bestimmen.) EINSTEINS Frage nach der Unendlichkeit des kosmischen Raumes bezieht sich also nicht auf den Anschauungsraum, sondern auf ein gedankliches Konstrukt verschiedener physikalischer Beobachtungsergebnisse und Folgerungen aus ihnen.

Unterschiedliche Raumkonzepte werden unterschiedliche geometrische Eigenschaften effizieren. Bekanntlich ist es Aufgabe der Geometrie, die unscharfen Wahrnehmungen mit mathematischer Strenge zu fassen. Welche geometrischen Eigenschaften hat der sinnliche Erfahrungsraum? Sucht man Geraden, Punkte und Ebenen und ihre gegenseitigen Anordnungen und Beziehungen in der Körperwelt anhand der zu diesen Grundelementen und ihren Verknüpfungen zugehörigen Sinnesqualitäten auf, sieht man: Größenverhältnisse ändern sich bei Wechsel der Perspektive (Sehsinn) oder bleiben bei Vergleichen mit starren Maßstäben (Tastsinn) konstant, Parallele berühren sich in den Fernpunkten (Sehsinn), die mit Maßstäben verglichenen Parallelen (Tastsinn) haben konstante Abstände usw. Die vielfältigen geometrischen Beobachtungen überspringend, für den Sehsinn siehe (KIENLE 1968), kann zusammengefasst werden, dass sich die Beobachtungen des Anschauungsraumes mit der projektiven Geometrie beschreiben lassen. Und die Eigenschaften des physikalischen Raumes der Allgemeinen Relativitätstheorie? EINSTEINS Einschätzung, dass es nach den Ergebnissen der Relativitätstheorie wahrscheinlich sei, dass der dreidimensionale Raum ein angenähert sphärischer sei, d. h. dass die Lagerungsgesetze starrer Körper in ihm nicht durch die euklidische, sondern angenähert durch die sphärische Geometrie gegeben würden, wenn man nur genügend große Gebiete der Betrachtung unterwürfe (EINSTEIN 1921), ist auch gegenwärtig zutreffend. Die projektive Geometrie stellt sich damit als geeignet zur Beschreibung auch dieser räumlichen Erfahrungen dar.

Sollen räumliche Größen nicht nur beschrieben, sondern gemessen werden, ist eine Funktion zu bestimmen die je zwei Punkten eines Raumes einen reellen Wert zuweist, der als Abstand der beiden Punkte aufgefasst werden kann. Nach F. KLEIN bestehen achtzehn verschiedene Möglichkeiten, einen projektiven Raum zu einem metrischen zu spezifizieren. Sollen die Messungen mit verschieb- und drehbaren starren Maßstäben erfolgen, ist der Abstand koordinatenmäßig bekannter Punkte so festzulegen, dass $d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ gilt. Die visuell erfahrenen Größen- und Parallelenverhältnisse sowie die Ergebnisse der Relativitätstheorie lassen sich so jedoch nicht beschreiben. Dafür sind nicht-euklidische Geometrien besser geeignet.

6 Resümee

Fassen wir die Ergebnisse zusammen: Aus der konsequent-empirischen Perspektive ergeben sich Bewegungen und Richtungen als interpretationsfreie Erfahrungen. Evidenzen, Synchronitäten und Ähnlichkeiten zwischen den Sinneserlebnissen legen nahe, einen Teil der nach-

einander erlebten Sinnesereignisse als zu dreidimensionalen Körpern gehörige Merkmale oder als Prozesse im Raum zu interpretieren. Diese Interpretation der Erfahrung als Erlebnisse einer dreidimensionalen Welt schafft rein äußerliche, von den spezifischen Eigenschaften unabhängige Zusammenhänge: Die zunächst ungeordneten Sinneserlebnisse erscheinen mit dieser Interpretation als Körper und Prozesse im Raum. Die Bildung der Körper und Prozesse ist nicht willkürlich, sondern von den Erfahrungen bestimmt. Sie hat ihre empirische Grundlage in den Sinnesempfindungen, vornehmlich der Bewegungen und der Richtungen. Die bei verschiedenen Beobachtungen erfahrenen geometrischen Verhältnisse lassen sich mit der projektiven Geometrie mathematisch exakt beschreiben. Die für Messungen einzuführende Metrik ist so zu wählen, dass die Beobachtungen zutreffend beschrieben werden. Auf diese Weise geht Raum nicht jeder Erfahrung voraus, sondern wird, wie andere Begriffe auch, anhand der Erfahrungen spezialisiert. Damit wird die Beweglichkeit in der Begriffsbildung jeweils nur soweit eingeschränkt, wie es sich aus den Beobachtungen ergibt.

7 Literaturverzeichnis

- COUCLELIS, H. 1999 Space, time, geography. In: Longley, P. A., M. F. Goodchild, D. J. Maguire & D. W. Rhind (Hrsg.) 1999 Geographical information systems. Volume 1: Principles and Technical Issues. New York, Weinheim, Toronto. S. 29 – 38
- DONNER, R. 2001 Visuelle Interpretation von Fernerkundungsdaten. In E. Seyfert: Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung. Band 10. Berlin 2001. S. 579-588
- EINSTEIN, A. 1916 Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie, Braunschweig. 17. erw. Auflage 1956. 105 S.
- EINSTEIN, A. 1921 Geometrie und Erfahrung. Erw. Fassung des Festvortrages vom 27. Januar 1921 in Berlin. In: A. Einstein: Mein Weltbild. Zürich/Stuttgart/Wien, 1953. S. 156-166
- JAMMER, M. 1980 Das Problem des Raumes. Darmstadt. 2. Auflage 1980. 240 S.
- KEBECK, G. 1994: Wahrnehmung. Theorien, Methoden und Forschungsergebnisse der Wahrnehmungspsychologie. Weinheim & München 1994, 350 S.
- KIENLE, G. 1966 Die optischen Wahrnehmungsstörungen und die nichteuklidische Struktur des Sehraumes. Thieme, Stuttgart 1968. - 172 S.
- KOCH, W. G. 2002 Raumverständnis und Raumkonzepte in der theoretischen Kartographie. *Wiss. Z. TU Dresden* 51(2002) 4/5. S. 41-48
- LUTZKER, P. 1996 Der Sprachsinne: Sprachwahrnehmung und Sinnesvorgang. *Logoi*; 12 Stuttgart. 325 S.
- SCHEURLE, H. J. 1984 Die Gesamtsinnesorganisation. Stuttgart, Georg Thieme, 2. Aufl., 192 S.
- SCHNEIDER, M. 1988 Satellitengeodäsie. BI-Wiss.-Verlag Mannheim Wien Zürich 597 S.
- TARNAS, R. 1991 Idee und Leidenschaft. Die Wege westlichen Denkens. München 1997, 671 S.
- ZAJONC, R. B. 1980 Feeling and Thinking. Preferences need no Inferences. *American Psychologist* 35(1980) 2. S.151-175

CityGML in der Praxis

Nutzung von 3D-Stadtmodellen mit kommerzieller Standard-Software

RÜDIGER DREES¹, ASTRID JAKOB², BERNHARD P. RUFF³

Zusammenfassung: 3D-Stadtmodelle finden in vielen Bereichen Anwendung, unter anderem in der Stadtplanung, der Funknetzplanung, im Katastrophenschutz, dem Tourismusmanagement oder in der Navigation. Größtenteils liegen die Stadtmodelle jedoch in proprietären Systemen vor, die rein graphische oder geometrische Modelle realisieren. Zudem wird ein Austausch von Daten zwischen unterschiedlichen Systemen durch proprietäre Datenformate erschwert.

In der Special Interest Group (SIG 3D), einer Initiative der Geodaten Infrastruktur Nordrhein Westfalen (GDI NRW), wurde CityGML als XML-basiertes Austauschformat entwickelt. Es stellt ein Anwendungsschema von GML3 (Geography Markup Language 3) dar. Die „OpenGIS CityGML Implementation Specification“ liegt derzeit dem OGC (Open Geospatial Consortium) als „Discussion Paper“ vor.

CityGML berücksichtigt nicht nur die Geometrie von 3D-Stadtmodellen, sondern auch topologische und semantische Aspekte. Dadurch können thematische Anfragen, gezielte räumliche Datensuche und -analysen verwirklicht werden. Die Repräsentation von 3D-Stadtmodellen erfolgt über ein einheitliches semantisches Datenmodell und ermöglicht so die Nutzung durch unterschiedliche Anwendungen.

Dieser Beitrag beschreibt die Umsetzung von CityGML zur Integration von 3D-Stadtmodellen in die bestehende Geodateninfrastruktur eines Großunternehmens. Die in einem ASCII-Format vorliegenden Ausgangsdaten werden über eine CityGML konforme, objektorientierte Modellierung in eine objektrelationale Datenbank (Oracle Spatial) überführt. Diese Datenbank gewährleistet einerseits die Austauschbarkeit von 3D-Stadtmodellen und andererseits berücksichtigt sie die Unternehmensprozesse, die sich unter anderem auf Standard-Clients wie SQL Plus, ESRI-Produkten, MapInfo oder MS-Office stützen. Weiterhin ist es möglich, auf die Stadtmodelle über webbasierten Service-Systemen und Map-Services zuzugreifen.

1 Einleitung

Für die Abwicklung von Unternehmensprozessen spielt die rechnergestützte Nutzung von Geoinformation eine immer größere Rolle. Basis hierfür sind in der Regel Standard-Softwareprodukte, die an die speziellen Bedürfnisse des Unternehmens angepasst und durch zusätzliche Entwicklungen ergänzt werden. Im vorliegenden Projekt sind die Softwareprodukte Oracle 10gR2 Locator, ArcSDE 9.1 und MapInfo 7.8 in einer Systemumgebung mit UNIX-Servern und Windows-Clients vorgegeben.

Um den multifunktionalen Anforderungen im Unternehmen gerecht zu werden und dabei einen reibungslosen Austausch von Geodaten zu gewährleisten, werden die Ergebnisse der SIG 3D aus der Initiative GDI NRW verwendet. Hier arbeiten Mitglieder aus den Bereichen Wissenschaft, Verwaltung, Softwareerstellung und Datennutzung zusammen, u. a. aus

¹ Rüdiger Drees, T-Systems Enterprise Services GmbH, Landgrabenweg 151, 53227 Bonn

² Astrid Jakob, Uni Bonn: Institut für Kartographie und Geoinformation, Meckenheimer Allee 172, 53115 Bonn

³ Bernhard P. Ruff, T-Systems Enterprise Services GmbH, Landgrabenweg 151, 53227 Bonn

Deutschland, Schweiz und Großbritannien. Seit 2002 entwickelt die SIG 3D-Arbeitsgruppe „Modellierung“ CityGML als Austauschformat für 3D-Stadtmodelle. Neben der Schaffung einer übergreifenden Semantik setzt das SIG 3D-Modell auf der ISO-Norm 19107 „Spatial Schema“ (HERRING, 2001) und der XML-Syntax aufbauenden Geography Markup Language (GML) (COX et al. 2004) in der Version 3.1 auf, um eine möglichst weitreichende Interoperabilität für den Datenaustausch zu schaffen (GRÖGER et al., 2005). CityGML stellt eine einheitliche Ontologie bereit, die geometrische, topologische, semantische sowie thematische Aspekte gleichermaßen berücksichtigt⁴.

Die Repräsentation von 3D-Stadtmodellen erfolgt über ein einheitliches semantisches Datenmodell (dargestellt als UML-Klassendiagramm) und ermöglicht so die Nutzung durch unterschiedliche Anwendungen. In Abhängigkeit von den Anforderungen bildet CityGML unterschiedliche Erfassungsgenauigkeiten und Detaillierungsgrade über den Level of Detail 0 bis 4 (LoD 0-4) ab. Das Gesamtmodell von CityGML umfasst die Repräsentationen von Bauwerken, Vegetation, Verkehrswegen, Geländemodell, Gewässern und Straßenmobiliar.

2 Problembeschreibung

Das zentrale Problem bei der Nutzung von Standardsoftware ist es, die unterschiedlichen Anforderungen an das RDBS (relationale Datenbanksystem) zu erfüllen. Neben den Anforderungen an die Betriebssicherheit und die Performance muss die Datenbankstruktur in der Lage sein, Daten von 3D-Stadtmodellen über das Austauschformat CityGML aufzunehmen und diese lesend für den Zugriff durch Client-Software zur Verfügung zu stellen. Für die Nutzung von ESRI-Komponenten wie ArcGIS als High-End GIS-Client und ArcIMS als Web Map Server, ist es notwendig, ArcSDE als Middleware vor das RDBS zu schalten.

Folglich steht auf der einen Seite die komplexe objektorientierte Modellierung, denn nur die genaue Übertragung der CityGML-konformen Datenmodellierung in ein Datenbankschema ermöglicht den Austausch mit externen Datenquellen über das Austauschformat CityGML. Auf der anderen Seite liefert nur eine einfache Datenbankstruktur Verbesserungen im Datenhandling, besonders, da auf die Rahmenbedingungen von ArcSDE und MapInfo Rücksicht genommen werden muss. Diese einfache Struktur wirkt sich auch positiv auf die gewünschten schnellen Zugriffszeiten aus, vor allem für Visualisierungen.

2.1 CityGML Standard und vorhandene Daten

Die T-Mobile Stadtmodelle liegen in der Detaillierungsstufe 2 (Level of Detail, LoD 2) vor. Das bedeutet, dass die komplexen Strukturen der realen Welt schon bei der Datenerfassung für die Stadtmodelle generalisiert werden. Daraus ergeben sich Vereinfachungen bei der Modellierung, was zu einer einfachen Datenbankstruktur führt.

Es werden z. B. keine Dachüberstände erfasst. Eingemessen werden First- und Traufpunkte. Von den Traufpunkten wird auf das Geländemodell abgelotet, um daraus die Grundrisspunkte abzuleiten. Damit kann das Volumen eines Gebäudes bestimmen werden, indem alle umgrenzenden Flächen zu einem Volumenkörper zusammenfügt werden. Bei Stadtmodellen, die Dachüberstände enthalten, dürfen diese Flächen nicht bei der Volumenberechnung berücksichtigt werden.

⁴ Nähere Informationen sind unter www.ikg.uni-bonn.de/sig3d zu finden

Je stärker die Datenbankstruktur durch Vereinfachungen vom CityGML-konformen Schema abweicht, desto schwieriger gestaltet sich jedoch der Import externer Stadtmodelle. Alle Unterschiede zur CityGML Struktur müssen durch optionale Erweiterungen der Datenbankstruktur oder durch algorithmische Umwandlung in der Importfunktion aufgefangen werden. Um alle Anforderungen erfüllen zu können, wird die CityGML Modellierung in anderen Teilbereichen erweitert. Beispielsweise sieht CityGML zurzeit noch keine Modellierung für Brücken und Mauern vor.

Ein Beispiel eines von T-Mobile im ASCII-Format erfassten Satteldachhauses zeigt Abbildung 1.

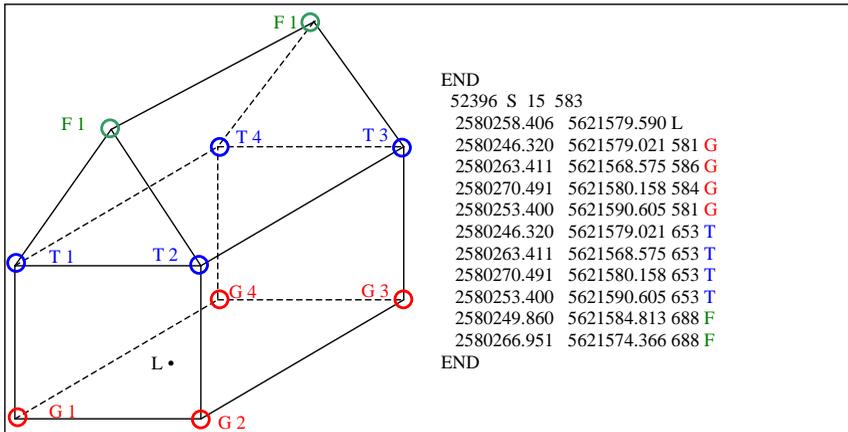


Abb. 1: Beispiel eines Satteldachhauses mit dazugehörigem Dateiausschnitt. L = Labelpunkt, G = Grundrisspunkt, T = Traufpunkt, F = Firstpunkt, S = Satteldach

2.2 Nutzung durch GIS-Software

Für die Bereitstellung von 3D-Daten über eine relationale Datenbank müssen die Daten in Tabellenform abgelegt sein. Hierbei wird die komplexe objektorientierte Datenmodellierung auf ein relationales Datenbankschema reduziert. In der Regel wird je Klasse eine Tabelle erstellt und Beziehungen werden auf Attribute abgebildet oder in Constraints übertragen.

Zur weiteren Nutzung durch ESRI-Produkte werden die Tabellen in ArcSDE registriert, die Geometrieinformationen enthalten. Dadurch werden die Tabellen in die ArcSDE-interne Datenverwaltung als Feature Class bzw. ArcSDE-Layer integriert. Alle Beziehungen der Layer untereinander sowie die Beziehungen zu reinen Attributtabelle werden mit Datenbankmitteln als JOIN wiederhergestellt. Diese Möglichkeit ist aufwändig und widerspricht der Anforderung an eine einfache Handhabung oder eine schnelle Visualisierung. Es ist deshalb erforderlich, die wichtigsten Informationen schon in der Datenbankstruktur zusammenzufassen.

3. Problemlösung

Um eine interoperable Datenbank zu schaffen, die alle geforderten Funktionalitäten erfüllt, müssen folgende Schritte verwirklicht werden:

- Zunächst wird die semantische Modellierung von CityGML an die T-Mobile Daten angepasst.
- Danach muss die Datenmodellierung in eine relationale Datenbank umgesetzt werden, wobei keine Information verloren gehen darf.
- Zuletzt muss der Zugriff auf die Daten über MapInfo oder ESRI-Komponenten ermöglicht werden.

3.1 Datenmodellierung

Die Datenmodellierung erfolgt auf abstrakter Ebene mit Hilfe der UML-Notation in Form von Klassendiagrammen. Zur Erläuterung werden die folgenden Formatierungen verwendet:

- `_CityObject` = abstrakte Klasse,
- `Building` = Klasse,
- `CITYOBJECT` = **Tabelle**,
- `RoofType` = *Datentypen*,
- `roofType` = **Attribute**.

3.1.1 Geometrie

Das hier verwendete Geometrie-Modell entspricht weitgehend dem von CityGML. Ein Unterschied besteht jedoch darin, dass in CityGML verschiedene Detaillierungsstufen (LoD 1 bis 4) für Objekte vorgesehen sind. Da die T-Mobile Stadtmodelle ausschließlich in einem LoD von 2 vorliegen, wurde auch nur diese Detaillierungsstufe realisiert.

3.1.2 Oberklassen (Top Level Class)

`_FT_Feature` ist die abstrakte Superklasse des CityGML-Modells, d. h., alle weiteren Klassen werden von dieser abgeleitet bzw. erben alle Eigenschaften. Da es sich bei T-Mobile um mehrere Stadtmodelle handelt, wird für die Modellierung die Klasse `_FeatureCollection` benötigt, um alle Stadtmodelle zu einer Kollektion zusammenzufassen.

Die einzelnen Stadtmodelle werden durch die Klasse `CityModel` repräsentiert, deren Attribute der Stadtname und das Stadtkürzel sind. Eine ganze Anzahl von Metadaten zum einzelnen Stadtmodell findet sich innerhalb des T-Mobile Geodatenserver. Sie werden in Abbildung 2 als eigenständiges System dargestellt.

Die Basisklasse aller thematischen Objekte ist die Klasse `_CityObject`. Die Klasse dient mit ihren Attributen für die Aufnahme von Metadaten, wie z. B. das Erstellungsdatum des Objektes (**creationDate**) oder das Löschdatum des Objektes (**terminationDate**).

Erweiterungen zu CityGML sind die Unterklassen `Antenna`, `Wall` und `Bridge` als angewandte Fachklassen der Entwicklungsklasse „`GenericObject`“ aus CityGML.

Die weitere Modellierung wird beispielhaft anhand des Gebäudemodells erläutert.

3.1.3 Gebäudemodell

Zur Repräsentation eines Gebäudes dient die Klasse `_AbstractBuilding`. Ein `_AbstractBuilding` ist entweder ein Gebäude (`Building`) oder ein Gebäudeteil (`BuildingPart`). Ein `_AbstractBuilding` hat jeweils umgebende Flächen (`BuildingSurface`). Anbauten, die nicht als eigenständiger Gebäudeteil existieren, z. B. Balkone oder Erker, werden in der Klasse `BuildingInstallation` modelliert. Häufig auftretende Datentypen wie der `RoofType` des Attributes `roofType` der Gebäudeklasse werden in den entsprechenden Code-Listen (`<<CodeList>>`) definiert und beschrieben (Abb. 3).

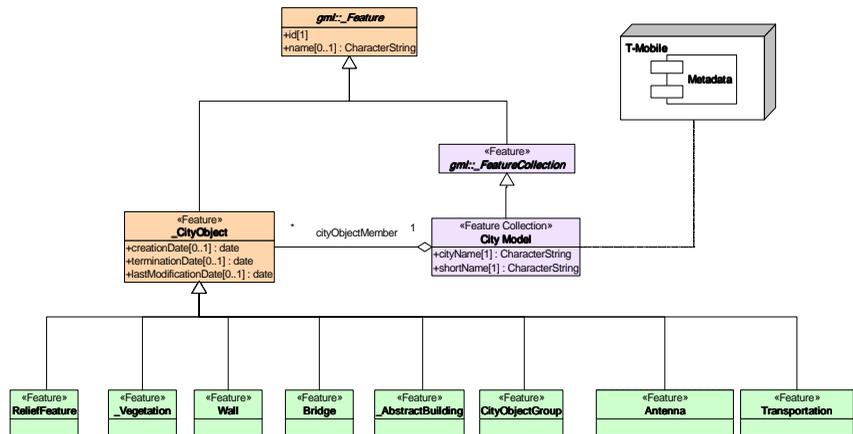


Abb. 2: UML-Klassendiagramm der Oberklassen

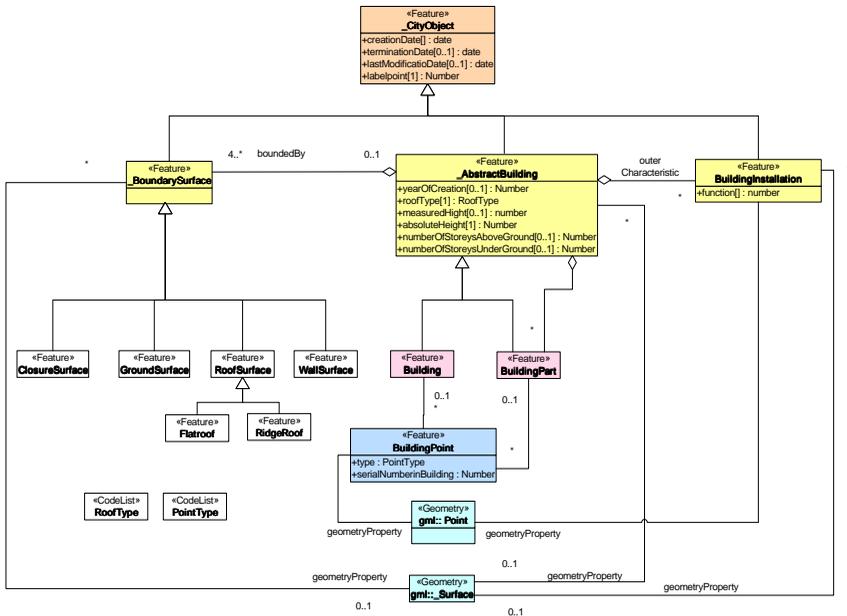


Abb. 3: UML-Klassendiagramm des Gebäudemodells.

Mit umgebenden Flächen (`_BoundarySurface`) sind die Polygone gemeint, die ein Gebäude umschließen. Diese können Wände (`WallSurface`), Dachflächen (`RoofSurface`), Grundflächen (`GroundSurface`) oder aber die bei der Volumenberechnung nötigen Abschlussflächen (`ClosureSurface`) bei offenen Objekten sein, wie z. B. bei Innenhöfen. `RoofSurface` besitzt hier als Erweiterung zu CityGML noch zwei spezialisierte Klassen: `Flatroof` und `RidgeRoof`. Somit können auf Modellierungsebene 3 verschiedene Typen von Dachflächen unterschieden werden:

- Ein Flachdach entspricht einem Gebäude ohne einen Firstpunkt, wie Flach- und Pultdach.
- Ein Firstdach ist ein Gebäudedachtyp mit einem oder zwei Firstpunkten, wie Zelt- und Satteldach.
- Der 3. Typ, `RoofSurface`, ist die Verallgemeinerung der beiden vorhergehenden, der nicht weiter differenziert wird.

Nach der Anforderungsanalyse müssen alle einzelnen Punkte (repräsentiert durch 3D-Koordinaten) separat ansprechbar sein und zudem ein Attribut besitzen, das den Punkt als Grundriss-, Trauf- oder Firstpunkt identifizieren kann.

Um diese Informationen verwalten zu können, wird eine zusätzliche Punkte-Klasse (`BuildingPoint`) gebildet. Sie hat als Attribute jeweils einen Typ und eine laufende Nummer innerhalb desselben Punkttyps eines Objektes. So kann überprüft werden, ob Trauf- und Grundrisspunkte in gleicher Anzahl vorliegen.

Zusätzlich zu den Objektpunkten werden die Labelpunkte in diese Klasse aufgenommen. Die Punkte werden mit Hilfe von *gml::Point* und die Flächegeometrie mit Hilfe von *gml::_Surface* repräsentiert.

3.2 Datenbankstruktur

Als nächster Schritt folgt die Abbildung des objektorientierten Datenmodells auf die relationale Oracle-Datenbank. Die UML-Diagramme bilden hier die Grundlage für die implementierungsabhängige Realisierung der Datenbankstruktur. Die Geometrie wird mit Hilfe des räumlichen Datentyps *SDO_Geometry* verwirklicht.

Die Umsetzung erfolgt zunächst mit Hilfe allgemeiner Abbildungsregeln. Jede Klasse wird auf eine Tabelle abgebildet, wobei die Attribute der Klasse zu den Spaltennamen der Tabelle werden. Eine N:M-Beziehung zwischen Klassen wird durch eine zusätzliche Verbindungstabelle in zwei N:1-Beziehungen aufgebrochen.

Die Ausnahmen von der Regel, jede Klasse auf eine Tabelle abzubilden, sind:

- Die Klasse *_BoundarySurface* mit all ihren Unterklassen wird auf Tabelle *THEMATICSURFACE* abgebildet.
- Die Klassen *_AbstractBuilding*, *Building* und *BuildingPart* werden zur Tabelle *BUILDING* verschmolzen.
- Die Geometrieklassen der ISO 19107/19123 werden zu Attributen des Datentyps *SDO_GEOMETRY*.
- Die Geometrieklasse *_Surface* mit all ihren Unterklassen wird auf die Tabelle *BUILDINGGEOMETRY* abgebildet.
- Die Geometrieklasse *BuildingPoint* kommt als Attribut mit dem Datentyp *SDO_Geometry* in die Tabelle *BUILDINGPOINT*.

Die Verschmelzung mehrerer Klassen zu einer Tabelle ist hier möglich, weil dadurch keine Informationen verloren gehen.

Das Datenbankschema des Gebäudemodells wird in Abbildung 4 dargestellt.

3.2.1 Tabellen für die Gebäudeklassen

Die Tabellen *BUILDING*, *INSTALLATION* und *THEMATICSURFACE* sind Unterklassen von *CITYOBJECT* und haben deshalb identischen IDs.

ROOFTYPE, BUILDING, POINTTYPE, BUILDINGPOINT

Die Tabelle *ROOFTYPE* entspricht der Codelist <<RoofType>> und hat als Felder zum einen den Primärschlüssel, dessen Werte aus den Kürzeln des Dachtyps bestehen, und eine Beschreibung, die die Kürzel erläutert (z. B.: *PK_RTY* = 'S', *Description* = 'Satteldach'). In der Tabelle *BUILDING* liegt der Fremdschlüssel (*FK_RTY*), der auf die Tabelle *ROOFTYPE* verweist. Um ein Gebäudeteil dem jeweiligen Gebäude zuordnen zu können, hat die *BUILDING*-Tabelle eine reflexive Assoziation: Der Fremdschlüssel *FK_BLD_AGG* verweist auf den Primärschlüssel der Tabelle und stellt damit die Beziehung von Gebäudeteil zum entsprechendem Gebäude her. Existiert eine solche Beziehung nicht wird der Wert = *NULL* gesetzt.

abgelegt werden. Zu den Einzelpunkten gehören nicht nur die Grundriss-, Trauf- und Giebelpunkte, sondern auch für jedes Haus ein Labelpunkt. Sollten über das Austauschformat CityGML Stadtmodelle eingeladen werden, zu denen zusätzlich zu den Flächen für eine Volumebildung auch andere Flächen gehören, wie z. B. Dachüberstände, wird dies mit Hilfe des Attributs **Is_Solid** gekennzeichnet. Der Wert des Attributs kann nur 0 (false) oder 1 (true) werden. Der Fremdschlüssel **FK_Pointtype** referenziert die Tabelle **POINTTYPE**, die der Codelist <<PointType>> aus der UML-Modellierung entspricht.

Die **SDO_GEOMETRY** im Feld **Geometry** der Tabelle **BUILDINGGEOMETRY** wird wie folgt eingeschränkt:

- der **SDO_GTYPE** muss den Typ Polygon haben, d.h. ein 3D-Polygon (**SDO_GTYPE** = 3003), und
- der **SDO_ETYPE** muss 1003/2003 mit **SDO_INTERPRETATION** = 1 sein (d.h. Polygon mit 3D-Koordinaten im Umring, begrenzt durch gerade Liniensegmente, ggf. mit Löchern).

3.3 Implementierung

Die Datenbankstruktur wird mittels SQL PLUS in der Oracle Datenbank implementiert. Durch die gewählte Datenbankstruktur, mit Zusammenfassung von mehreren Klassen zu einer Tabelle, reduziert sich der Aufwand für die Registrierung der Layer in ArcSDE. So muss für eine reine Visualisierung des 3D-Stadtmodells nur die Tabelle **BUILDINGGEOMETRY** registriert werden. Dies kann über die mitgelieferten Werkzeuge von ArcSDE durchgeführt werden.

Möchte der Nutzer der 3D-Stadtmodelle zusätzlich zur Visualisierung auf thematische Informationen zugreifen, werden über ArcSDE geeignete Views bereitgestellt, die auf die Geometrietabellen und Tabellen mit thematischen Informationen zugreifen. Damit ist gewährleistet, dass die Datenbankstruktur nicht geändert werden muss.

4 Fazit

Die proprietär erfassten 3D-Stadtmodelle sind mit Hilfe der flexiblen Erweiterungsfähigkeit von CityGML und der Möglichkeit, verschiedene Level of Detail zu nutzen ohne Probleme an das Datenmodell von CityGML angepasst worden.

Es ist gelungen die komplexe Datenmodellierung in eine einfache Datenbankstruktur umzusetzen. Dies wurde einerseits mit Hilfe des räumlichen Datentyps (**SDO_Geometry**) erreicht, andererseits dadurch, dass Klassen auf Attribute von Tabellen abgebildet wurden.

Die so erstellte Datenbankstruktur erlaubt eine schnelle Visualisierung der Geometrie der 3D-Stadtmodelle. Geeignete Views ermöglichen einen gleichzeitigen Zugriff auf Geometrie und thematischen Informationen ohne dass der Nutzer eigens Verknüpfungen durchführen muss oder dass in die Datenbankstruktur eingegriffen werden muss.

Das Ergebnis ist eine den Anforderungen entsprechendes, standardisiertes und zentrales Geodatenbanksystem. Es legt den Grundstein für eine Vielzahl von Nutzern, die auf die bereitgestellten Daten im Datenbanksystem entweder über das Intranet direkt oder über Web Map Services mit unterschiedlicher Client-Software zugreifen können. Die hierdurch vergrößert

ßerte Anzahl der Anwender verbessert den Nutzen der Geodaten im Unternehmen und sichert damit die Investitionen zur Beschaffung von Geodaten – und dies bei zusätzlichen Einsparungen in der Verwaltung von Geodaten.

5 Literaturverzeichnis

- COX, S., DAISY, P., LAKE, R., PORTELE, C., WHITESIDE, A., 2004: OpenGIS Geography Markup Language (GML 3.1), Implementation Specification Version 3.1.0, Recommendation Paper, OGC Doc. No. 03-105r1.
- GRÖGER, G., BENNER, J., DÖRSCHLAG, D., DREES, R. et al., 2005: Das interoperable 3D-Stadtmodell der SIG 3D, Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, 6/2005.
- HERRING, J., The OpenGIS Abstract Specification, Topic 1: Feature Geometry (ISO 19107 Spatial Schema), Version 5. OGC Document Number 01-101, 2001.
- SPECIAL INTEREST GROUP 3D (SIG 3D), 2006: OpenGIS CityGML Implementation Specification Version 0.3.0, Discussion Paper, OGC Doc. No. 06-057

Neue topographische Karten der Mars-Oberfläche

STEPHAN GEHRKE¹, HARTMUT LEHMANN¹, ROBERT KÖHRING¹,
FRANK SCHOLTEN², MARITA WÄHLISCH², JÖRG ALBERTZ¹

Zusammenfassung: Die High Resolution Stereo Camera (HRSC) auf Mars Express erfasst die Mars-Oberfläche stereoskopisch und in Farbe. Aus den Bilddaten werden am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Berlin Digitale Geländemodelle (DGMs) und farbige Orthobild-Mosaik abgeleitet, die zum Teil an der Technischen Universität Berlin in Kartenprodukte umgesetzt werden. Das Standardkartenwerk der Mission Mars Express ist die „Topographic Image Map Mars 1:200 000“. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über das kartographische Konzept, die Kartenherstellung unter Verwendung des Software-Pakets „Planetary Image Mapper“ (PIMap) und aktuell hergestellte topographische Bildkarten der Mars-Oberfläche: die Kartierung der äquatornahen Region Iani Chaos in drei verschiedenen Maßstäben sowie die ersten erstellten Regelblätter der Nordpol-Region.

1 Einleitung

In den vergangenen zwei Jahren hat die *High Resolution Stereo Camera* (HRSC) an Bord des *Mars Express* Orbiters mehr als die Hälfte der Mars-Oberfläche stereoskopisch und in Farbe erfasst. Aus den HRSC-Daten werden am *Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (DLR) in Berlin-Adlershof systematisch Digitale Geländemodelle (DGM) und farbige Orthobild-Mosaik abgeleitet (SCHOLTEN et al., 2005). Aus einem Teil dieser Daten erstellt die *Technische Universität Berlin* topographische Bildkarten unseres Nachbarplaneten, allen voran die Blätter der *Topographic Image Map Mars 1:200 000*, her. Konzept und Layout dieses Standard-Kartenwerks der Mission dienen auch als Vorgabe für die Erstellung von Sonderblättern und topographischen Karten größerer Maßstäbe sowie zur Ableitung thematischer Kartenprodukte (ALBERTZ et al., 2004a).

Bereits in Vorbereitung auf die *Mission Mars Express* (GEHRKE et al., 2003) sowie seit 2004, mit der Datenaufnahme durch die HRSC, wurden und werden topographische Bildkarten der Mars-Oberfläche erstellt; Beispiele zeigen ALBERTZ et al. (2004a, 2004b, 2005), LEHMANN et al. (2005) und GEHRKE et al. (2006). Eigens für diese Zwecke wurde an der *Technischen Universität Berlin* das kartographische Software-Paket *Planetary Image Mapper* (PIMap) entwickelt. Mit PIMap kann der Karteninhalt – Orthobildmosaik, Höhenlinien, Gitternetze, Randlinien, Kartentitel, Blattbezeichnung und typische Legendelemente – generiert bzw. zum digitalen Kartenblatt zusammengestellt werden (GEHRKE & NEUKUM, 2005).

Im Anschluss an einen Überblick über das kartographische Konzept der *Topographic Image Map Mars 1:200 000* und die Kartenherstellung unter Verwendung der Software PIMap werden nachfolgend zwei aktuelle Teilprojekte vorgestellt. So ist die Region Iani Chaos in

¹ Technische Universität Berlin, Geodäsie und Geoinformationstechnik, Sekr. H 12, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin, E-Mail: {stephan | h.lehmann | robert | albertz}@igg.tu-berlin.de

² Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Planetenforschung, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin, E-Mail: {frank.scholten | marita.waehlich}@dlr.de

zwei benachbarten Standardblättern sowie in den größeren Maßstäben 1:100 000 und 1:50 000 – basierend auf einer entsprechenden Unterteilung des Regelblattschnitts in Viertel bzw. Sechzehntel – kartiert worden. Des Weiteren liegen nunmehr zwei Standardblätter des nördlichen Polargebietes vor; sie zeigen das Chasma Boreale, eine weit in die Eiskappe hineinragende Schlucht. Die beiden Karten liegen nördlich bzw. südlich des 85. Breitengrades, im Übergangsbereich zwischen der *Sinusoidalprojektion* und der in der Polregion angewendeten *Flächentreuen Lambertischen Azimutalprojektion*. Eine aus HRSC-Daten erstellte, kombinierte topographisch-thematische Karte der Centauri und Hellas Montes wird in einem eigenen Beitrag von LEHMANN et al. (2006) präsentiert. Sie basiert auf dem hier vorgestellten kartographischen Konzept.

2 Kartographisches Konzept und Kartenherstellung

Das Grundkonzept für die Abbildung der Mars-Oberfläche im Maßstab 1:200 000 ist ausführlich bereits an anderer Stelle, beispielsweise von ALBERTZ et al. (2004a, 2004b), erläutert worden; es wird nachfolgend zusammenfassend wiedergegeben. Eine detaillierte Beschreibung der für die Kartenherstellung verwendeten Software PIMap findet sich bei GEHRKE & NEUKUM (2005).

2.1 Das Kartenwerk „Topographic Image Map Mars 1:200 000“

Die neue, großmaßstäbige *Topographic Image Map Mars 1:200 000* ist das Standardkartenwerk der *Mars Express* Mission. Es basiert auf Daten der HRSC: Orthobildmosaik bilden die Kartengrundlage, und Höhenlinien werden aus HRSC-DGMs abgeleitet. Weiterhin enthalten die Karten Beschriftungen der benannten Oberflächenformen sowie Landeplätze, einen Blattnamen und ihre Blattbezeichnung nach GREELEY & BATSON (1990), ergänzt durch erläuternde Legendeneinträge. Abb. 3 und Abb. 5 zeigen Kartenbeispiele.

Das Kartenwerk teilt den Planeten Mars in 10 372 Blätter in flächentreuen Projektionen. Zwischen 85° nördlicher und südlicher Breite, was 10 324 Karten entspricht, wird die *Sinusoidalprojektion* angewendet, für die übrigen 48 Blätter in den Polgebieten die *Lambertsche Flächentreue Azimutalprojektion*. Jedes Blatt deckt in der Breite 2° ab. Die Ausdehnung in der Länge nimmt auf Grund der Meridiankonvergenz mit der Breite zu; sie beträgt 2° um den Äquator und steigt über mehrere Zonen bis auf 360° für die Poldarstellungen an, so dass die Größe des Kartenfeldes etwa konstant bleibt. Der Blattschnitt basiert auf planetozentrischen Breiten und östlichen Längen, dem ellipsoidischen Standardkoordinatensystem auf der Mars-Oberfläche (ALBERTZ et al., 2004a). Lagebezug ist ein Rotationsellipsoid mit Halbachsen von 3 396,19 km und 3 376,20 km; Höhenlinien beziehen sich auf die Äquipotenzialfläche mit einem mittlerem Äquatorradius von 3 396,00 km, das Areoid (SEIDELMANN et al., 2002).

Das Kartenwerk bildet die Grundlage für die systematische Ableitung von großmaßstäbigen Karten – indem es analog zu amtlichen Kartenwerken auf der Erde systematisch in Viertel bzw. Sechzehntel eingeteilt wird –, Sonderblättern und thematischen Kartenprodukten.

2.2 Kartenherstellung mit PIMap

Die Herstellung der topographischen Bildkarten der Mars-Oberfläche erfolgt weitgehend automatisch unter Verwendung des kartographischen Software-Pakets *Planetary Image Mapper* (PIMap), welches an der *Technischen Universität Berlin* entwickelt wurde (GEHRKE & NEU-

KUM, 2005). Grundsätzlich können mit PIMap Gradabteilungskarten, wie sie in der Planetenkartographie nahezu ausschließlich gebräuchlich sind (siehe z.B. GREYLEY & BATSON, 1990), in beliebiger Lage und Größe generiert werden.

Sämtliche Eigenschaften, Form und Inhalte einer zu erstellenden Karte sind in der Steuerdatei zusammengefasst; je nach Karteninhalt müssen weitere Daten zur Verfügung stehen. An Hand dessen werden in PIMap die entsprechenden Elemente generiert und in das Kartenblatt eingepasst. Ergebnis ist eine PDF-Datei, welche sämtliche Vektor- und Rasterdaten dieses Blattes enthält – vgl. Datenflussschema (Abb. 1). Von besonderer Bedeutung ist die nachträgliche Editierbarkeit der einzelnen Objekte, so dass die automatisch generierte Karte mit kommerzieller Software (*Adobe Illustrator, Macromedia Freehand, Corel Draw*) kontrolliert bzw. weiter bearbeitet werden kann. Die Nachbearbeitung ist unter anderem für die endgültige Platzierung der topographischen Namen von Bedeutung, die in bestimmten Fällen noch der betreffenden Oberflächenform, z.B. einem Talverlauf, anzupassen sind.

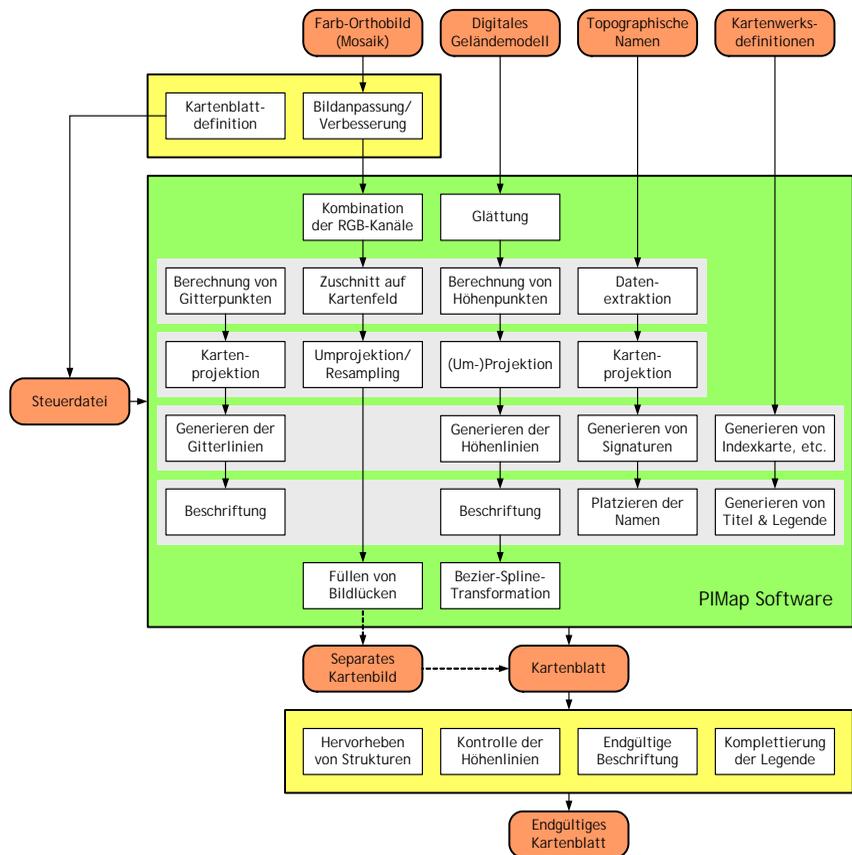


Abb. 1: Datenfluss bei der Kartenherstellung unter Verwendung der Software PIMap einschließlich der notwendigen Vor- und Nacharbeiten

3 Kartierung von Iani Chaos in verschiedenen Maßstäben

Iani Chaos ist eine große Senke mit einer Ost-West-Ausdehnung von 430 km und einer Nord-Süd-Ausdehnung von 330 km. Die Region liegt östlich des Canyon-Systems Valles Marineris bei 2,8° südlicher Breite und 342,5° östlicher Länge (USGS, 2006a). Im Norden angrenzend, erstreckt sich das Tal Ares Valles über eine Länge von etwa 1400 km bis zu seiner Mündung in die Chryse Planitia im Bereich des nördlichen Tieflands der Mars-Oberfläche. In diesem Mündungsgebiet landete 1997 die amerikanische Mission Mars Pathfinder.

Die Entstehung von Iani Chaos wird auf vulkanische Aktivitäten zurückgeführt, welche vermutlich das im ursprünglichen Gebirge gespeicherte Eis zum Abtauen gebracht haben. Das Schmelzwasser ergoss sich, dem Gefälle folgend, nach Norden in das Ares Valles. Überreste des einstigen Geländes, welches nach dem Abfließen des Wassers einstürzte, da sich im Untergrund Hohlräume gebildet hatten, formen heute als verstreute Hügel und Blöcke eine „chaotische“, zerklüftete Oberflächenstruktur (FU Berlin, 2006). Dass diese Landschaft also höchstwahrscheinlich durch fließendes Wasser geformt wurde, macht sie aus geologischer Sicht besonders interessant; auf Grund dessen stellt sie auch eine eindrucksvolle Grundlage für die Herstellung topographischer Bildkarten dar (Abb. 2).

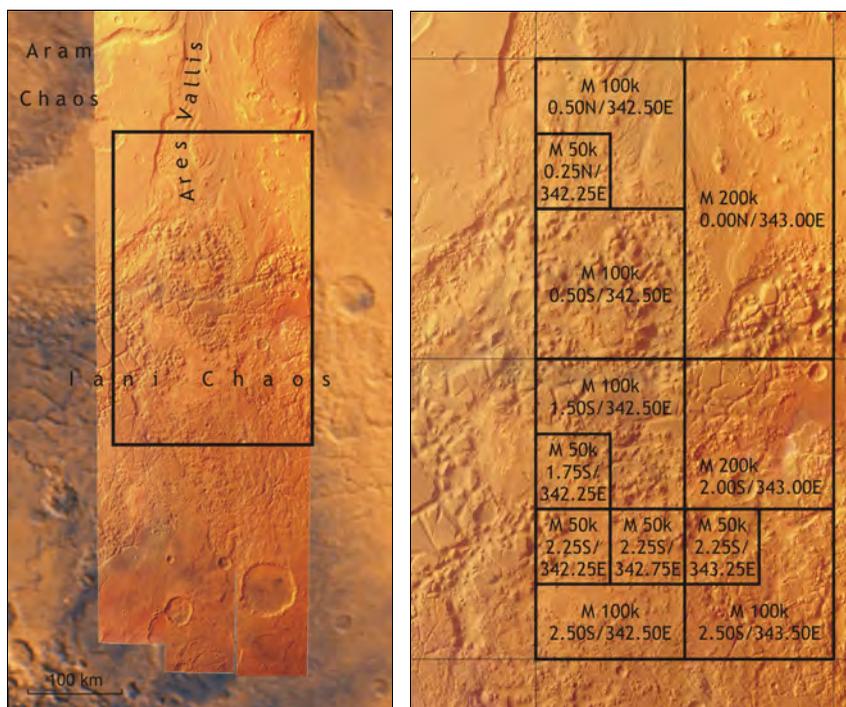


Abb. 2: links: Abdeckung der Iani Chaos Region in den HRSC-Bildstreifen 912 (östlicher Teil), 923 (Mitte) und 934 (westlicher Teil), eingebettet in Farbbilddaten der Viking-Mission (USGS, 2006b); Rechts: Übersicht der erstellten Kartenblätter in den Maßstäben 1:200 000, 1:100 000 und 1:50 000

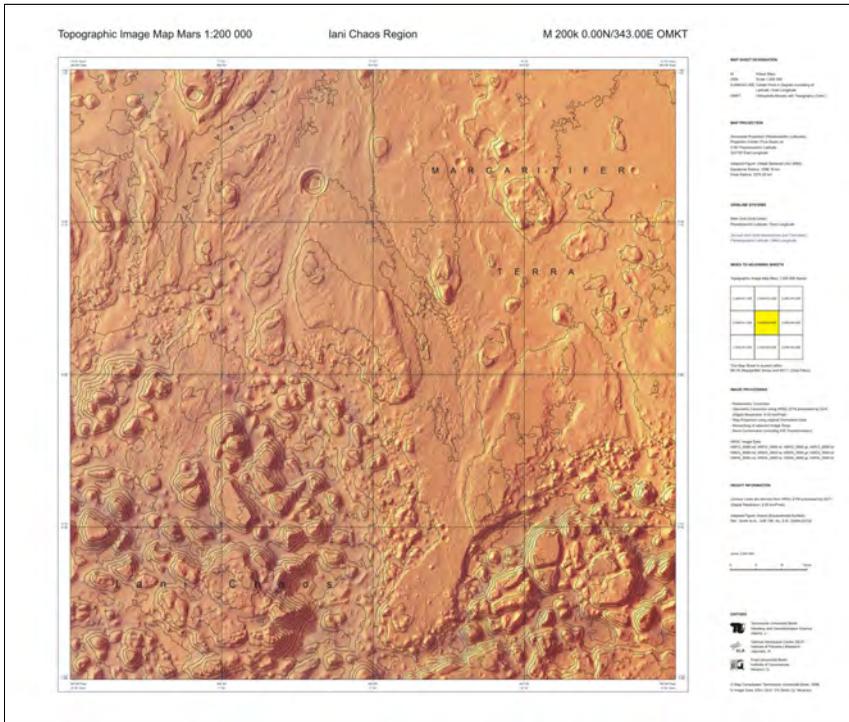


Abb. 3: *Topographic Image Map Mars 1:200 000*, Kartenblatt „M 200k 0.00N/343.00E OMKT“

Die Region wurde von der HRSC in den Orbits 912, 923 und 934 in nahezu höchster Bodenauflösung aufgenommen. Die photogrammetrische Prozessierung – einschließlich IHS-Transformation („pan-sharpening“ der Farbkanäle) sowie Mosaikierung der benachbarten Orbits – erfolgte am DLR (SCHOLTEN et al., 2005; GWINNER et al., 2005). Das resultierende Orthobildmosaik hat eine Auflösung von 12,5 m/Pixel, das DGM eine Rasterweite von 50 m. An der *Technischen Universität Berlin* wurden zwei Karten im Regelblattschnitt der *Topographic Image Map Mars 1:200 000*, „M 200k 2.00S/343.00E OMKT“ und „M 200k 0.00N/343.00E OMKT“ (GEHRKE et al., 2006; Abb. 3), sowie mehrere Teilblätter in den Maßstäben 1:100 000 und 1:50 000 hergestellt. Eine Übersicht bietet Abb. 2; für einen Teil des Iani Chaos, der die charakteristischen Hügel und Fließstrukturen zeigt, sind in Abb. 4 Ausschnitte aus drei entsprechenden Karten in verschiedenen Maßstäben gegenübergestellt.

Dem kartographischen Konzept nach 2.1 folgend, gleichen sich die verschiedenen Kartenblätter im Papierformat sowie dem grundsätzlichen Layout; sie sind alle mit „Iani Chaos Region“ bezeichnet. Aufgrund der unterschiedlichen Maßstäbe ergeben sich Bildauflösungen von 406, 203 bzw. 102 dpi, letztere in 1:50 000. Obwohl sich hier vereinzelt Kompressionseffekte andeuten (z.B. an schattigen Hängen), sind grundsätzlich feinere Texturen erkennbar. Mit größer werdenden Kartenmaßstäben wurden kleine Äquidistanzen der Höhenlinien definiert, so dass die Geländetopographie entsprechend detailliert wiedergegeben werden kann.

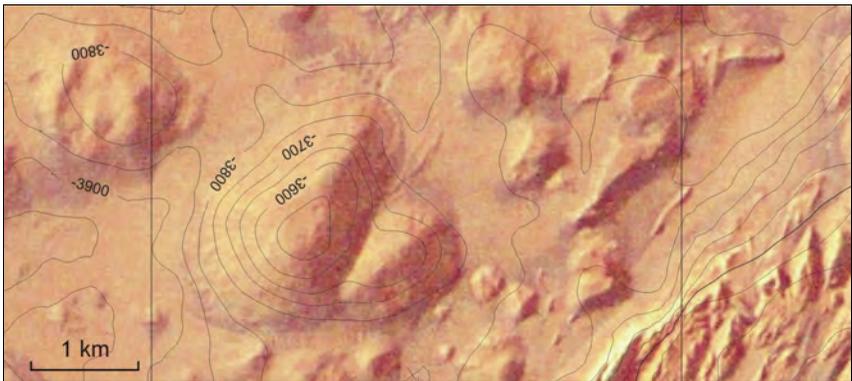
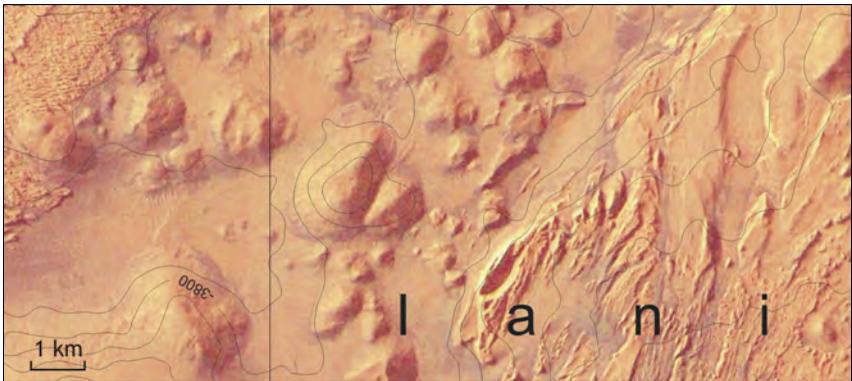
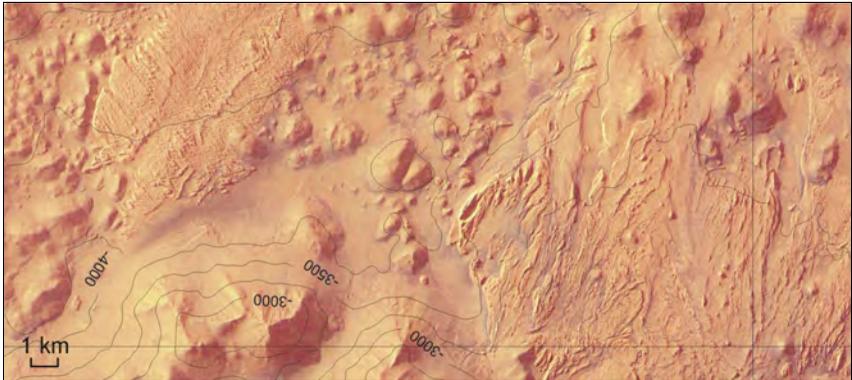


Abb. 4: Teilgebiet der Region Iani Chaos – Ausschnitte aus einem Standardkartenblatt der *Topographic Image Map Mars 1:200 000* („M 200k 0.00N/343.00E OMKT“, oben) und aus Teilblättern in den Maßstäben 1:100 000 („M 100k 0.50N/342.50E OMKT“, Mitte) sowie 1:50 000 („M 50k 0.25N/342.25E OMKT“, unten)

4 Die ersten großmaßstäbigen Kartenblätter des nördlichen Polargebiets

Die Abb. 5 zeigt zwei Standardblätter im Übergangsbereich zwischen den beiden Kartenprojektionen der *Topographic Image Map Mars 1:200 000*: „M 200k 84.00N/315.00E OMKN“, in der nördlichsten Zone der *Sinusoidalprojektion* gelegen, und „M 200k 86.00N/324.00E OMKN“, ein Blatt aus der unmittelbar anschließenden, südlichsten Zone der *Lambertschen Flächentreuen Azimutalprojektion*. Das letztgenannte Kartenblatt grenzt in der südöstlichen Hälfte an das erstere, wobei dieser Bereich vollständig vom Eis der nördlichen Polkappe des Mars bedeckt. Die Region wird vom Chasma Boreale durchzogen, das sich über insgesamt 300 km erstreckt und die Eiskappe beinahe in zwei Hälften teilt. In der Schlucht sind Staub- bzw. Sandablagerungen in Form von Dünen, den Hyperboreae Undae, zu erkennen.

Mit zunehmendem Abstand vom Äquator, wo die sinusoidalen Blätter ein (nahezu) quadratisches Kartenfeld aufweisen (vgl. Abb. 3), zeigt sich die Auswirkung der Meridiankonvergenz und damit die charakteristische Trapezform. (Es sei angemerkt, dass sich die Meridiane im Gegensatz zu den Parallelkreisen nicht als Geraden abbilden; sie zeigen bekanntermaßen – eine geringe Abplattung des Bezugsellipsoides vorausgesetzt (vgl. Halbachsen in 2.1) – sinuskurvenähnliche Verläufe. Bei der Breitenausdehnung der *Topographic Image Map Mars 1:200 000* von 2° sind die Abweichungen von einer Geraden jedoch marginal und liegen unter 0,05 mm.)

Die gezeigten Kartenblätter wurden an der *Technischen Universität Berlin* hergestellt und basieren auf den vom DLR bereitgestellten, kartenprojizierten HRSC-Bildern (SCHOLTEN et al., 2005) des Orbits 1154. In den hier gezeigten Versionen, „OMKN“ (farbiges Orthobildmosaik als Grundlage, ergänzt durch topographisches Namensgut), enthalten die Karten keine Höhenlinien.

5 Fazit

Seit Beginn der Mission *Mars Express* werden an der *Technischen Universität Berlin* exemplarisch mehrer Kartenblätter der *Topographic Image Map Mars 1:200 000* auf der Basis von HRSC-Bilddaten hergestellt. Dazu zählen neben den Regelblättern auch Sonderkarten unterschiedlicher Maßstäbe, die in ihrer Lage an charakteristische Landschaftsformen der Mars-Oberfläche bzw. HRSC-Orbits angepasst sind. Die hier vorgestellten Arbeiten, die systematisch in den Maßstäben 1:200 000, 1:100 000 und 1:50 000 kartierte Region Iani Chaos sowie die ersten Kartenblättern des Nordpolargebiets, erweitern die Bandbreite der auf dem Konzept der *Topographic Image Map Mars 1:200 000* basierenden Kartenprodukte. Sie demonstrieren insbesondere die Flexibilität dieses kartographischen Konzepts aber auch die Qualität der HRSC-Bilddaten und abgeleiteten Geländemodelle.

Mit PIMap liegt ein Softwareprodukt vor, welches sämtliche Inhalte einer planetaren topographischen Bildkarte weitgehend automatisch und vor allem erstmals gemeinsam generiert und in das digitale Blatt einpasst. Der operationelle Einsatz innerhalb der Mission *Mars Express* zeigt, dass sich mit wenigen interaktiven Abschlussarbeiten qualitativ hochwertige Kartenprodukte erstellen lassen.

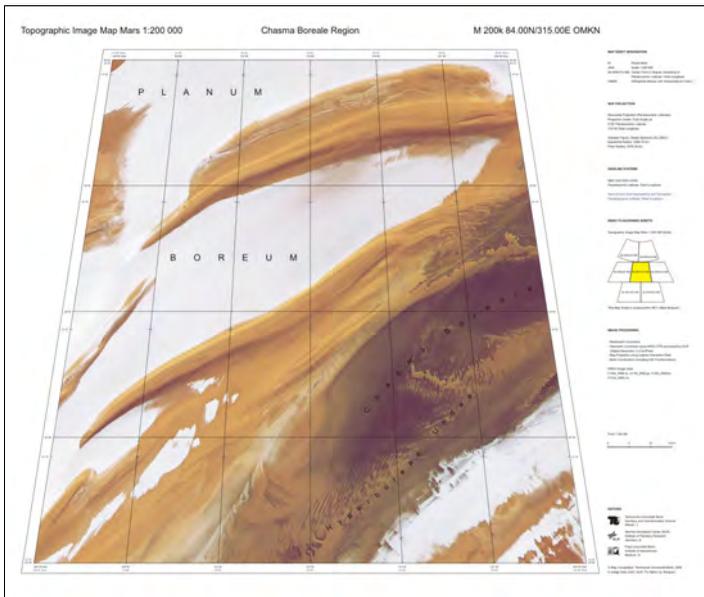
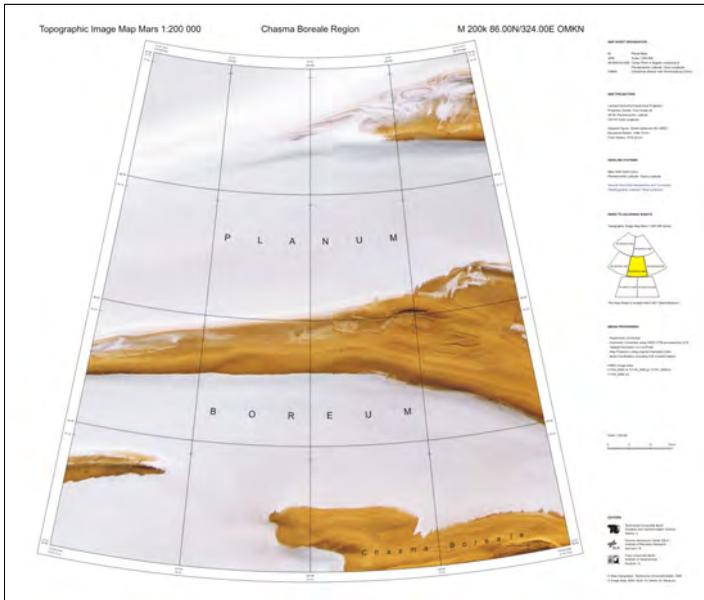


Abb. 5: Standardblätter „M 200k 84.00N/315.00E OMKT“ und „M 200k 86.00N/324.00E OMKT“ der *Topographic Image Map Mars 1:200 000* im Übergangsbereich zwischen *Sinusoidalprojektion* (unten) und *Lambertscher Flächentreuer Azimutalprojektion* (oben) im Gebiet des Chasma Boreale

6 Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten sind Teil des an der *Technischen Universität Berlin* laufenden Forschungsvorhabens „Software Development and Technical Support for Cartographic Data Processing“ („Software-Entwicklung und technische Unterstützung für die kartographische Datenverarbeitung“) im Rahmen von „HRSC on Mars Express“. Dieses Vorhaben wird durch das DLR aus Mitteln des *Bundesministeriums für Bildung und Forschung* (BMBF) gefördert.

Principal Investigator des Experiments „HRSC on Mars Express“ ist Prof. Dr. Gerhard Neukum, Freie Universität Berlin.

7 Literaturverzeichnis

- ALBERTZ, J., GEHRKE, S., WÄHLISCH, M. et al., 2004a: Digital Cartography with HRSC on Mars Express. – The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istanbul, XXXV (B4): 869-874.
- ALBERTZ, J., GEHRKE, S., WÄHLISCH, M. et al., 2004b: Die ersten Blätter des neuen Kartenwerks „Topographic Image Map Mars 1:200,000“. – Vorträge 24. Jahrestagung der DGPF, Band 13, Halle: 555-564.
- ALBERTZ, J., GEHRKE, S., LEHMANN, H. et al., 2005: Precise Topographic and Thematic Maps of Planet Mars. – Proceedings XXII International Cartographic Conference (ICC 2005), A Coruña.
- FU Berlin, 2006: HRSC Bildserie #182 – Iani Chaos. – www.geoinf.fu-berlin.de/projekte/mars/hrsc182-IaniChaos.php (Juni 2006).
- GEHRKE, S., WÄHLISCH, M., LEHMANN, H., et al., 2003: Cartography with HRSC on Mars Express – A Specimen of the New Series “Topographic Image Map Mars 1:200,000”. – Proceedings ISPRS WG IV/9 Extraterrestrial Mapping Workshop, Houston.
- GEHRKE, S. und NEUKUM, G., 2005: Das kartographische Softwarepaket „Planetary Image Mapper“ (PIMap). – Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG), 5/2005: 417-422.
- GEHRKE, S., LEHMANN, H., KÖHRING, R., et al., 2006: Iani Chaos in Three Scales – A Topographic Image Map Mars 1:200,000 and its Subdivisions. – Lunar and Planetary Science (LPS) XXXVII, Houston, Paper #1325.
- GREELEY, R. und BATSON, R.M., 1990: Planetary Mapping. – 296 S., Cambridge University Press, Cambridge.
- GWINNER, K., SCHOLTEN, F., GIESE, B. et al., 2005: Hochauflösende Digitale Geländemodelle der Marsoberfläche. – Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG), 5/2005: 387-394.
- LEHMANN, H., GEHRKE, S., ALBERTZ, J. et al., 2005: Großmaßstäbige topographische und thematische Mars-Karten. – Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG), 5/2005: 423-428.
- LEHMANN, H., VAN GASSELT, S., GEHRKE, S. et al., 2006: Eine kombinierte topographisch-thematische Karte der Centauri und Hellas Montes (Mars). – Vorträge 26. Jahrestagung der DGPF, Band 15, Berlin (dieser Band).
- SEIDELMANN, P.K. et al., 2002: Report of the IAU/IAG Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements of the Planets, and Satellites: 2000. – Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, Vol. 82: 83-110.

- SCHOLTEN, F., ROATSCH, T., GWINNER, K. et al., 2005: Von Rohdaten aus dem Mars Express Orbit zu Digitalen Geländemodellen und Orthobildern – Operationelle Verarbeitung von HRSC Daten. – Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG), 5/2005: 365-372.
- USGS, 2006a: Gazetteer of Planetary Nomenclature. – planetarynames.wr.usgs.gov (Juni 2006)
- USGS, 2006b: PDS MAP-A-PLANET. – pdsmaps.wr.usgs.gov. (Juni 2006)

Aktualisierung von Geodaten in einer Multiple Representation Database

JAN-HENRIK HAUNERT¹

Zusammenfassung: In zunehmendem Maße werden topographische Datensätze unterschiedlicher Maßstäbe in einer gemeinsamen Datenbank gehalten. Die Fortführung der Daten innerhalb einer solchen Datenbank ist ein aktuelles Problem der Geoinformatik. Im Allgemeinen wird, ausgehend von einem Quelldatensatz, eine Propagierung von Information in einen Zieldatensatz geringerer Auflösung mittels Generalisierung angestrebt.

In der Kartographie wird die Landschaft üblicherweise in Flächen unterschiedlicher Landnutzungs- und Vegetationsklassen gegliedert. Die Aggregation dieser Flächen ist eine wichtige Aufgabe der Modellgeneralisierung. In diesem Beitrag wird ein iteratives Aggregationsverfahren, welches lokale Beziehungen zwischen Objekten berücksichtigt, einem globalen Optimierungsverfahren gegenübergestellt. Die Möglichkeiten zum Einsatz der Verfahren für die Fortführung werden diskutiert.

1 Multiple Representation Database (MRDB)

Datenbanken, welche es ermöglichen, verschiedene Repräsentationen der Realität gemeinsam zu führen, werden im Allgemeinen mit dem Begriff „Multiple Representation Database“ (MRDB) bezeichnet. In dem besonders häufigen Fall der Verwaltung von Geodaten unterschiedlicher Maßstäbe wird auch oft der Begriff „Multiple Resolution Database“ verwendet. Die Datenbestände werden in einer MRDB durch Links zwischen korrespondierenden Objekten der unterschiedlichen Maßstabsebenen verknüpft.

Eine MRDB lässt sich auf zwei verschiedenen Wegen aufbauen. Zum einen ist es möglich, mehrere bestehende Datensätze miteinander zu verlinken. Hierbei liegt die wesentliche Schwierigkeit in der Entwicklung geeigneter Zuordnungsverfahren. Zum anderen kann eine MRDB durch Ableitung der Folgemaßstäbe aus einem Ausgangsdatensatz mittels Generalisierung erzeugt werden. Die Herausforderung liegt dabei in der Entwicklung geeigneter Generalisierungsverfahren, wohingegen sich die Zuordnungen direkt aus der Generalisierung ergeben.

Im ersten Fall existieren zwischen den verschiedenen Datensätzen oft Differenzen, die keiner bestimmaren Regel folgen. Diese können beispielsweise durch eine unterschiedliche Interpretation der Realität bei der Erfassung der verschiedenen Datensätze entstanden sein oder sind von der Natur einer rein geometrischen Ungenauigkeit. Bei der Fortführung ergibt sich hierbei das Problem der geometrischen Datenhomogenisierung. Neue Information, die aus einem größeren Maßstab übernommen werden soll, muss zunächst in den existierenden Datenbestand topologisch korrekt eingepasst werden. Auf dieses Problem soll an dieser Stelle allerdings nicht vertieft eingegangen werden. Als Kernproblem der Fortführungsaufgabe wird stattdessen die automatische Generalisierung behandelt.

2 Generalisierung

Generalisierungsverfahren werden im MRDB-Ansatz für zwei verschiedene Aufgaben eingesetzt. Zum einen ist es möglich eine MRDB durch Erzeugung verschiedener Generalisie-

¹ Dipl.-Ing. Jan-Henrik Haunert, Institut für Kartographie und Geoinformatik, Universität Hannover, Appelstraße 9a, 30167 Hannover, e-mail: jan.haunert@ikg.uni-hannover.de

stufen aus einem detaillierten Datensatz aufzubauen. Zum anderen können Generalisierungsverfahren eingesetzt werden, um Änderungen in kleinere Maßstäbe zu übertragen und die MRDB somit aktuell zu halten. Im zweiten Fall wird gewöhnlich von „inkrementeller Generalisierung“ gesprochen. Da hierbei von einem existierenden Datenbestand im Zielmaßstab ausgegangen werden kann, sind nur solche Objekte erneut zu generalisieren, die auch von der Aktualisierung betroffen sind.

In diesem Abschnitt werden zunächst die entwickelten Generalisierungsverfahren in ihrer grundlegenden Form dargestellt, bevor in Abschnitt 3 auf Besonderheiten für die Anwendung auf den Aktualisierungsfall eingegangen wird.

2.1 Aggregation

Topographische Datenbanken beinhalten in der Regel Information über die Landbedeckung durch verschiedene Nutzungsarten oder Vegetationsformen. Üblicherweise wird hierfür eine Tessellation der Ebene bzw. ein Polygonmosaik ohne Überlappungen und Lücken definiert, wobei jedes Polygon einer Landbedeckungsklasse zugewiesen ist.

Die Generalisierung einer derartigen Landbedeckungskarte umfasst in der Regel die Generalisierung von Klassen sowie die Zusammenfassung von Objekten. Ein Beispiel für die Generalisierung von Klassen ist, dass Laubwald und Nadelwald im kleineren Maßstab durch die Klasse Wald ersetzt werden. Die Zusammenfassung von Objekten bzw. die Aggregation ist erforderlich, um die geforderten Mindestgrößen des Zielmaßstabs zu erfüllen ohne Lücken entstehen zu lassen.

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die Zuordnungen zwischen den Klassen des Ausgangs- und Zielmaßstabes bekannt und eindeutig sind. Diese Voraussetzung ist bei topographischen Datensätzen in der Regel gegeben, da die Datenmodelle für verschiedene Maßstäbe aufeinander aufbauen. In diesem Fall kann das Aggregationsproblem isoliert betrachtet werden. Eine ausführliche Diskussion des Aggregationsproblems wird von VAN SMAALEN (2003) geführt.

Bei der Aggregation sind alle Objekte zu topologisch zusammenhängenden Regionen zusammenzufassen, deren Flächeninhalte mindestens den Betrag des Schwellwertes für den Zielmaßstab erreichen müssen. Um diese Bedingung zu erfüllen, ist es erforderlich die Klassenzugehörigkeit einzelner Objekte zu ändern. Generell wird angestrebt möglichst wenige dieser Klassenänderungen durchzuführen, bzw. Änderungen zu Klassen mit möglichst ähnlicher Semantik vorzunehmen (PODRENEK, 2002). Beispielsweise wird man es vorziehen, eine Fläche der Klasse „Forst“ in „Wald“ umzuwidmen, anstatt sie der Klasse „See“ zuzuordnen. Ein weiteres Ziel ist es, möglichst kompakte Flächen zu erschaffen, bzw. komplizierte Geometrien zu vermeiden. Die Kompaktheit kann beispielsweise durch die Länge der Flächenbegrenzung ausgedrückt werden, wobei eine kurze Begrenzung für eine kompakte Geometrie spricht. Prinzipiell muss zwischen der semantischen Ähnlichkeit der Klassen und der geometrischen Kompaktheit ein Kompromiss eingegangen werden. Die Leistungsfähigkeit eines lokalen Algorithmus und eines globalen Optimierungsalgorithmus wurde zunächst allerdings für das Ziel ähnlicher Klassen isoliert betrachtet.

2.1.1 Iterativer Algorithmus (Region Growing)

Häufig werden für die Aggregation iterative Algorithmen eingesetzt, die Abwandlungen des bekannten Region Growing Verfahrens sind. Üblicherweise wird in jeder Iteration die kleinste Fläche gewählt und mit einem Nachbarn vereinigt, bis alle Flächen die geforderte Mindestgröße erreichen (VAN OOSTEROM, 1995).

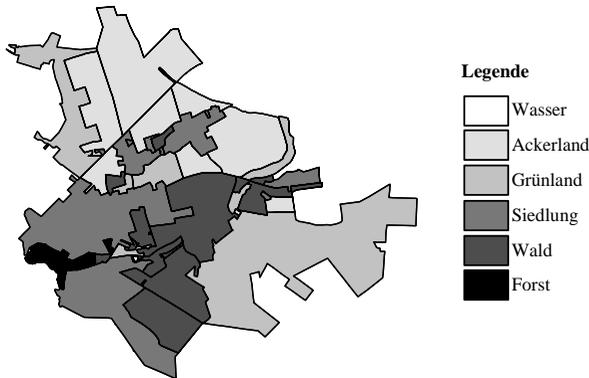


Abb. 1: Ausgangssituation im DLM 50

In unserem Fall wird der Nachbar mit ähnlichster Klasse gewählt. Haben mehrere Nachbarn dieselbe Klasse, so wird davon die größte Fläche gewählt. Auf diese Weise lässt sich eine Lösung in linearer Zeit bestimmen, die allerdings in der Regel nicht die optimale Lösung darstellt. Global betrachtet gibt es unter Umständen Lösungen, die vorzuziehen sind.

Abb. 1 zeigt ein Beispiel, welches aus dem digitalen Landschaftsmodell DLM 50 des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystem (ATKIS) entnommen ist. Der Inhalt des DLM 50 orientiert sich an der topographischen Karte im Maßstab 1:50.000.

Unter der Berücksichtigung semantischer Ähnlichkeiten zwischen den Klassen wurden die Flächen mit dem iterativen Algorithmus aggregiert. Hierbei wurden die Schwellwerte des DLM 250 eingesetzt, welches der topographischen Karte im Maßstab 1:250.000 entspricht.

Die resultierenden Klassen sind in Abb. 2 dargestellt. Flächen, welche die Mindestgröße des Zielmaßstabes nicht erfüllen und keinen direkten Nachbarn derselben Klasse haben, ändern mit großer Wahrscheinlichkeit ihre Klasse. Ein Beispiel hierfür ist die Siedlungsfläche unten links in Abb. 1, die in Wald umgewidmet wird. Diese relativ drastische Änderung ist allerdings nicht erforderlich, da es möglich wäre, durch die Änderung einer vergleichsweise kleinen Waldfläche eine Verbindung zu einer zweiten Siedlungsfläche herzustellen. Dass eine solche Lösung durch einen iterativen Algorithmus gefunden wird, der nur lokal nach der besten Lösung sucht, ist nicht wahrscheinlich. Aus diesem Grund wird im nächsten Abschnitt ein globales Optimierungsverfahren vorgestellt.

2.1.2 Globale Optimierung

In einer zurückliegenden Arbeit (HAUNERT & WOLFF, 2006) wurde ein globales Optimierungsverfahren für die Aggregation entwickelt und getestet. Die Aggregation wird dabei als Färbungsproblem des Nachbarschaftsgraphen formuliert. Hierin wird jede Fläche durch einen Knoten dargestellt. Jede Kante drückt aus, dass die inzidenten Knoten eine gemeinsame Grenze haben. Der Graph ist also planar. Jedem Knoten v ist ein Gewicht $w(v)$ zugeordnet, welches dem Flächeninhalt entspricht. Außerdem hat jeder Knoten v eine Farbe $\gamma(v)$, die der ursprünglichen Klasse entspricht. Gesucht sind nun die neuen Farben $\gamma'(v)$, so dass das gesamte Gewicht einer zusammenhängenden Komponente gleicher Farbe jeweils den Schwellwert des Zielmaßstabes θ erfüllt und

$$\sum_{v \in V} w(v) \cdot d(\gamma(v), \gamma'(v)) \quad \text{minimiert wird.}$$

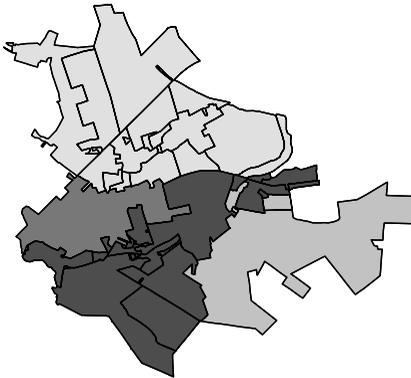


Abb. 2: Ergebnis des iterativen Algorithmus

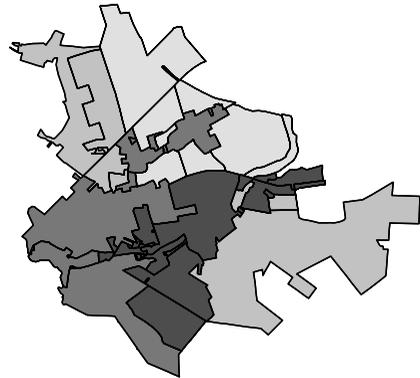


Abb. 3: Ergebnis der globalen Optimierung

Die Distanzfunktion d definiert dabei Kosten, die pro Flächeneinheit für den Wechsel zwischen zwei Farben anfallen. Zusätzlich wird gefordert, dass in jeder Komponente mindestens eine Fläche ihre Farbe beibehält. Durch diese Forderung wird vermieden, dass Farben im Zielmaßstab auftauchen, die nicht im Ausgangsmaßstab vorhanden sind.

Dieses Problem kann als *Mixed Integer Program* (MIP) formuliert werden, welches neben der linearen Zielfunktion Bedingungen in Form linearer Ungleichungen umfasst. Die Variablen hierin dürfen zum großen Teil nur ganzzahlige Werte annehmen.

Ein MIP kann von Standard-Software gelöst werden. Dabei kommen *Branch and bound* Verfahren zum Einsatz, bei denen ausgenutzt wird, dass viele Kombinationen von Werten für Variablen frühzeitig ausgeschlossen werden können. Dieses geschieht vor allem dann, wenn die abzehbaren Gesamtkosten unter Annahme dieser Werte in jedem Fall höher sind als die Kosten der optimalen Lösung. Für diese Abschätzung werden untere und obere Schranken für die Zielfunktion benötigt. Untere Schranken können hierbei gewonnen werden, indem Ganzzahligkeitsbedingungen relaxiert werden, da die Kosten nach dieser Veränderung des Problems allenfalls geringer sein können. Hierbei ergeben sich gewöhnliche lineare Programme, die beispielsweise über den Simplex Algorithmus gelöst werden können. Die Grundlagen von MIPs bzw. der gemischt-ganzzahligen Optimierung und Anwendungsmöglichkeiten werden von KALLRATH (2002) dargelegt.

Das MIP für das Aggregationsproblem beruht im Wesentlichen auf der Definition eines Flusses auf den Kanten des Graphen. Ein ähnliches Modell für ein anderes Problem wurde von SHIRABE (2006) vorgestellt. Das MIP liefert die Lösung, die in Abb. 3 dargestellt ist. Nur wenige Flächen mussten verändert werden, um die Voraussetzungen des Zielmaßstabes zu erfüllen. Weitergehende Forschung ist allerdings notwendig, um kompaktere Regionen zu erzielen.

Der Nachweis des Optimums für die Lösung der Instanz mit 50 Knoten benötigt bereits über 20 Stunden. Eine Möglichkeit die Rechenzeit zu verringern besteht darin, die Berechnung bei ausreichend guter Approximation der optimalen Lösung abzubrechen. Eine Lösung, die garantiert, dass sie höchstens 10% schlechter ist als das Optimum, ist beispielsweise sicherlich zufriedenstellend. Die Tests zeigten allerdings, dass diese Einschränkung nicht ausreicht um übliche Datensätze in angemessener Zeit zu prozessieren.

Bei vielen Problemen lassen sich zwar effiziente Algorithmen finden, die eine ähnliche Performance-Garantie versprechen. Ein solcher Approximationsalgorithmus ist allerdings für das Aggregationsproblem nicht bekannt. Aus diesem Grund wurden Heuristiken eingeführt, bei

denen unwahrscheinliche Lösungen ausgeschlossen werden. Die Garantie, die optimale Lösung zu finden, geht somit zwar verloren, aber es werden zufriedenstellende Lösungen in angemessener Zeit erzielt. Die optimalen Lösungen, die für kleinere Beispiele ohne den Einsatz von Heuristiken erzielt wurden, dienen hierbei als Referenz, anhand der die getroffenen Annahmen verifizieren werden können. Die Tests ergaben, dass auch Datensätze von 400 Flächen noch in angemessener Zeit nahezu optimal gelöst werden können. Umfangreiche Tests und Laufzeitmessungen wurden durchgeführt (HAUNERT & WOLFF, 2006).

2.2 Kollaps

In einigen Fällen reicht es nicht aus, die Generalisierung einer Landbedeckungskarte als reines Aggregationsproblem anzusehen. Beispielsweise werden Flüsse, die in großen Maßstäben flächenhaft dargestellt sind, in kleineren Maßstäben durch eine linienförmige Geometrie repräsentiert. In diesem Fall ist also ein Geometriotypwechsel zu vollziehen. Gleichzeitig stellt sich allerdings auch hier die Frage, wie die frei gewordenen Flächen auszufüllen ist. Eine Zuweisung zu einem Nachbarn ist hierbei nicht sinnvoll. Stattdessen ist die ursprüngliche Fläche so auf die Nachbarn zu verteilen, dass das erzeugte Linienobjekt die neue Grenze zwischen den Nachbarn bildet.

Generell besteht die Vorgehensweise darin, diese Kollaps-Operationen zuerst durchzuführen und anschließend die Flächen zu aggregieren. Bei der Aggregation ist es möglich Bedingungen einzufügen, die sicherstellen, dass Grenzen, welche durch abgeleitete Linienobjekte gebildet werden, erhalten bleiben. Alternativ können zusätzliche Kosten definiert werden, die anfallen, wenn über diese Grenzen hinaus zusammengefasst wird.

Für den Kollaps wurde ein Operator entwickelt, der auf dem Straight Skeleton beruht (HAUNERT, 2005). Der Operator ist beispielhaft für eine Fläche in Abb. 4 dargestellt. Das Straight Skeleton ist vorteilhaft, da es neben der linienförmigen Repräsentation des Objektes eine Unterteilung der ursprünglichen Fläche in Teilflächen liefert. Hierbei kann jede Teilfläche genau einer Kante des Polygons und somit genau einem Nachbarn zugeordnet werden (Abb. 4b). Das Resultat dieses Kollaps ist in Abb. 4d dargestellt. Außerdem ist es möglich, unterschiedliche Gewichte für Kanten zu definieren und das Skelett somit in eine bevorzugte Richtung zu verlagern (Abb. 4c). Auf diese Weise können auch Nachbarschaftsbeziehungen zu anderen Objekten bewahrt werden.

Das Straight Skeleton ermöglicht einen partiellen Kollaps einer Fläche. Hierbei wird nur für solche Teile der Fläche ein Skelett berechnet, in denen eine Mindestbreite unterschritten wird. Diese Variante ist zum Beispiel für den Geometriotypwechsel von Flüssen relevant, die ab einer bestimmten Breite flächenförmig darzustellen sind.

3 Aktualisierung

Mit den beschriebenen Generalisierungsalgorithmen ist es prinzipiell jederzeit möglich, Flächendatensätze kleinerer Maßstäbe aus einem detaillierten Basisdatensatz abzuleiten. Wird der Basisdatensatz laufend aktuell gehalten, so können also auch aktuelle Daten im kleineren Maßstab erzeugt werden. Die automatische Generalisierung größerer Datenbestände ist allerdings eine zeitintensive Prozedur, die nicht nach jeder kleinen Veränderung des Basisdatensatzes durchgeführt werden sollte. In der Regel ist dieses auch nicht erforderlich, da eine lokale Änderung im Basisdatensatz nur begrenzte Auswirkungen auf den Zieldatensatz hat. Stattdessen reicht es aus, die Teile des Zieldatensatzes neu zu generieren, die von den Änderungen beeinflusst sind. Dieses ist die Zielsetzung der inkrementellen Generalisierung (KILPELÄINEN, T. & SARJAKOSKI, 1995).

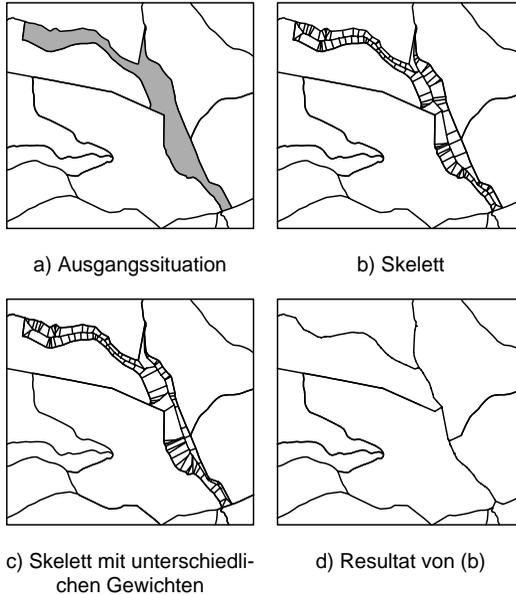


Abb. 4: Kollaps-Operator basierend auf dem Straight Skeleton.

3.1 Aktualisierung durch Auswertung von Links oder Produktionen

Die Propagierung von Änderungen kann durch Links zwischen korrespondierenden Objekten erleichtert werden. Wird ein Objekt im Basisdatensatz geändert, so ist im einfachsten Fall nur das korrespondierende Objekt im Zieldatensatz zu aktualisieren, auf welches effizient über die Links zugegriffen werden kann.

In den seltensten Fällen werden einzelne Objekte bei der Generalisierung allerdings isoliert behandelt. In der Regel fließen Relationen zu anderen Objekten wie Nachbarschaften mit in die Generalisierung ein, so dass die Abhängigkeiten zwischen Objekten unterschiedlicher Datensätze in der Regel sehr komplex sind.

In vielen Fällen reicht es dennoch aus, eine kleine Teilmenge des Datenbestandes zu berücksichtigen, um ein Ergebnis zu generieren, das der Generalisierung des gesamten Datensatzes exakt gleicht. Eine sehr ausgefeilte Methode für die inkrementelle regelbasierte Generalisierung wurde von SKOGAN & SKAGESTEIN (2005) vorgestellt. Die Herangehensweise hierbei ist, die gesamte Generalisierung in Form von Produktionen bei der globalen Prozessierung aufzuzeichnen. Die Auswertung dieser Produktionen gibt im Fall einer Aktualisierung Auskunft über die bestehenden Abhängigkeiten zwischen Ziel- und Basisdatensatz. Somit kann der Einfluss einer Änderung ermittelt werden. Das Verfahren ist wirksam, wenn der Generalisierungsprozess in Module gegliedert ist, die aus der Auswertung von Regeln und dem darauf folgenden Ausführen überschaubarer Aktionen basiert. Die in Abschnitt 2 vorgestellten Aggregationsverfahren weisen allerdings die Charakteristik auf, den gesamten Datensatz innerhalb relativ abgeschlossener Algorithmen oder global zu prozessieren. Ähnliche Herangehensweisen werden häufig auch für andere komplexe Generalisierungsprobleme gewählt.

3.2 Inkrementeller Algorithmus für das Region Growing

Der iterative Algorithmus in Abschnitt 2.1.1 weist noch am ehesten eine Ähnlichkeit zu dem regelbasierten System von SKOGAN & SKAGESTEIN (2005) auf, denn auch hier erfolgt die Generalisierung durch schrittweise Analyse und Ausführung von Aktionen. Die Reihenfolge der Prozessierungen ist hierbei allerdings durch die Größe der Flächen fest vorgegeben. Ferner ist bekannt, welche Objekte in einem Iterationsschritt ausgewertet werden, da stets direkte Nachbarn des selektierten Objektes betrachtet werden. Da auch die Kriterien bekannt sind, nach denen der Nachbar für die Zuweisung ausgewählt wird, können die Abhängigkeiten zwischen den Datensätzen rekonstruiert werden, ohne dass eine Aufzeichnung der einzelnen Schritte durchgeführt wurde. Der folgende inkrementelle Algorithmus nutzt diese Tatsache aus. Zunächst sind folgende Definitionen erforderlich:

- Die Region aus Objekten im Zieldatensatz, die alle aktualisierten Objekte im Ausgangsdatensatz überdeckt, heißt „innere Region“.
- Die Region, die alle Nachbarn der inneren Region im Zieldatensatz enthält, heißt „Grenzregion“.
- Alle anderen Objekte bilden den „Außenbereich“.

Wird der iterative Algorithmus auf den aktualisierten Datensatz angewendet, so kann sich nur dann eine Änderung im Außenbereich einstellen, wenn zuvor die Grenzregion von den Änderungen der inneren Region beeinflusst wurde. Dieses kann nur geschehen, wenn ein Objekt der inneren Region einem Objekt der Grenzregion zugewiesen wird oder umgekehrt. In beiden Fällen wird die Trennung von Grenzregion und innerer Region verletzt.

Demnach braucht der iterative Algorithmus zunächst nur auf die Objekte in der inneren Region und der Grenzregion angewendet werden. Tritt eine Vereinigung ein, welche die Trennung beider Regionen verletzt, so können die Regionen nachträglich ausgedehnt werden.

Inkrementeller Algorithmus:

Wende den iterativen Algorithmus auf die Objekte im Ausgangsdatsatz an, die sich innerhalb der inneren Region und der Grenzregion befinden. Wenn die Trennung von innerer Region und Grenzregion durch eine Vereinigung verletzt wird,

- *halte den Algorithmus an,*
- *dehne die innere Region auf die Objekte im Zieldatensatz aus, die an dieser Vereinigung beteiligt waren,*
- *dehne die Grenzregion auf die Nachbarn im Zieldatensatz aus,*
- *hole die Vereinigungen innerhalb der neu hinzugekommenen Flächen nach, welche gemäß der definierten Prozessierungsreihenfolge vor der oben genannten Vereinigung auszuführen sind und*
- *setze die Aggregation der Objekte in innerer Region und Grenzregion fort.*

Das Ergebnis entspricht exakt dem Ergebnis des iterativen Algorithmus bei Anwendung auf den gesamten Datensatz, doch die Anzahl der ausgewerteten Objekte ist sehr begrenzt.

Tests zeigten, dass die Regionen in der Regel nicht weiter als bis zu den Nachbarn zweiter Ordnung der direkt betroffenen Objekte expandiert werden müssen.

4 Ausblick

Die in Abschnitt 3 erläuterten Verfahren der inkrementellen Generalisierung gehen von einer modularisierten oder iterativen Vorgehensweise bei der Generalisierung aus. Nach der Aktualisierung des Basisdatensatzes sind nur wenige Prozessierungsschritte auszuführen, um den Zieldatensatz aufzudatieren, da ein großer Teil der ursprünglichen Generalisierung seine Gültigkeit behält. Die erzeugten Ergebnisse gleichen dabei exakt dem Resultat einer erneuten Prozessierung des gesamten Datensatzes. In vielen Fällen kann allerdings nicht von den getroffenen Voraussetzungen ausgegangen werden. Das globale Optimierungsverfahren aus Abschnitt 2.1.2 ist ein Beispiel, bei dem es schwieriger ist, die Information über eine ursprünglich gefundene Lösung hilfreich für die Prozessierung des aktualisierten Datensatzes einzusetzen. Da *Branch and bound* Verfahren allerdings auf einer Zerlegung des Gesamtproblems in Teilprobleme beruhen und eine optimale Lösung für einen großen Teil des Datensatzes bekannt ist, ist auch hier anzunehmen, dass der Rechenaufwand im Aktualisierungsfall reduziert werden kann.

Ein prinzipielles Problem liegt dagegen vor, wenn der Zieldatensatz ursprünglich nicht durch ein automatisches Generalisierungsverfahren entstanden ist. Wurde er stattdessen unabhängig erfasst, so macht es keinen Sinn zu fordern, dass nach der Übertragung einer Änderung in den kleineren Maßstab dasselbe Ergebnis wie nach einer globalen Generalisierung vorliegen soll. Die unabhängig erfassten Daten weisen schließlich ohnehin Differenzen zum Ergebnis eines automatischen Verfahrens auf. Hier wird man ebenfalls die aktualisierten Objekte und ihren Kontext analysieren und nach einer Generalisierung in den Zielmaßstab einfügen, wobei allerdings nicht klar definiert ist, welches Ausmaß dieser Kontext hat. Sicher macht es auch hier Sinn, die Menge der betrachteten Objekte räumlich einzugrenzen. Hierfür könnte ähnlich wie beim inkrementellen Algorithmus aus Abschnitt 3.2 eine schrittweise Ausdehnung dieses Einflussgebietes geschehen. Zu diesen offenen Fragen ist weitere Forschung erforderlich.

5 Literaturverzeichnis

- HAUNERT, J.-H., 2005: Geometriotypwechsel in einer Multi-Resolution-Datenbank. Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Aga-Tagung 2004.
- HAUNERT, J.-H. & WOLFF, A., 2006: Generalization of land cover maps by mixed integer programming. Eingereicht für: Proc. of 14th International Symposium on Advances in Geographic Information Systems, November 10–11, 2006, Arlington, Virginia, USA.
- KALLRATH, J., 2002: Gemischt-ganzzahlige Optimierung: Modellierung in der Praxis. 1. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig.
- KILPELÄINEN, T. & SARJAKOSKI, T., 1995: Incremental generalization for multiple representations of geographic objects. In: Muller, J. C., Lagrange, J. P. & Weibel, R. (Edt.) GIS and Generalization: Methodology and Practise. Taylor & Francis, London, S. 209-218.
- VAN OOSTEROM, P., 1995: The GAP-tree, an approach to 'on the fly' map generalization of an area partitioning. In: Muller, J. C., Lagrange, J. P. & Weibel, R. (Editoren) GIS and Generalization: Methodology and Practise. Taylor & Francis, London, S. 120-132.
- PODRENEK, M., 2002: Aufbau des DLM50 aus dem Basis-DLM und Ableitung der DTK50 – Lösungsansatz in Niedersachsen. In: KS, Band 6, Kartographie als Baustein moderner Kommunikation, S.126-130, Bonn.
- SKOGAN, D. & SKAGESTEIN, G., 2005: An Automated Incremental Generalization Method. In: Skogan, D. (Autor) Multiple Resolution and Consistency, PhD Thesis, Department of Informatics, University of Oslo, Norway.
- VAN SMAALEN, J.W.N., 2003: Automated Aggregation of Geographic Objects, Dissertation, Wageningen University, Niederlande.

Zur automatischen Integration thermischer Texturen und Merkmale in Gebäudemodelle

H. KUMKE¹, L. HOEGNER², L. MENG³, U. STILLA⁴

Zusammenfassung: Das Thema zeigt einen Überblick über das Projekt und beschäftigt sich mit den ersten Projektschritten der Datenintegration thermaler Bilddaten in einer 3D Datenbank. Zusätzlich wird auf erweiterte Texturinformationen für eine Datenbankabfrage eingegangen. Es zeigt somit einen Ausschnitt der Herausforderungen und Probleme zum jetzigen Stand des Projektes auf.

1. Einleitung

Bisherige virtuelle 3D-Stadtmodelle haben sich auf eine photorealistische Darstellung mit fotografierten bzw. simulierten Texturen konzentriert. Ihre Anwendungen bleiben sehr begrenzt, da georeferenzierte Sachdaten in nicht-sichtbaren Bereichen unzugänglich sind. Mit Rücksicht auf den drastisch wachsenden Bedarf an komplexen 3D stadträumlichen Geoinformationen wird im Rahmen unseres Projekts das Potential der Integration, Analyse und Visualisierung thermaler Infrarotinformationen untersucht. Als Grundlage dienen Matching-Verfahren, 3D-Kartographie und die nichtphotorealistische Technik zur 3D-Informationsvermittlung aus dem Bereich Computergraphik (ZHANG ET AL., 2005; SHI & MENG, 2006; HAEBERLING, 2004; STROTHOTTE & SCHLECHTWEG, 2002; NIENHAUS & DÖLLNER, 2003).

Ausgehend von der automatischen Texturierung von Gebäudemodellen mit Thermographiebildern (Hoegner et al., 2006) hat die vorliegende Arbeit zum Ziel, unterschiedlichste Basis- und Sachdaten für die Integration in 3D-Gebäudemodelle aufzubereiten. Insbesondere wird auf die Datenhaltung von Texturen für die Gebäudefassaden eingegangen und ein Auszug der markantesten Sachinformationen von IR-Texturen für eine objektrelationalen 3D-Datenbank vorgestellt.

2. Überblick

Dieses Kapitel gewährt einen Überblick über die geplante Umsetzung des DFG-Projekts in einem Bündelvorhaben. Abb.1 verdeutlicht die zentrale Rolle der Datenbank und die unterschiedlichen Bereiche für die Datenintegration, der Datenanalyse und der Datenvisualisierung.

¹ Dipl.-Ing. Holger Kumke, Lehrstuhl für Kartographie, Technische Universität München, Arcisstraße 21, 81033 München, holger.kumke@bv.tum.de

² Dipl.-Inf. Ludwig Hoegner, Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München, Arcisstraße 21, 81033 München, ludwig.hoegner@bv.tum.de

³ Prof. Dr.-Ing. Liqiu Meng, Lehrstuhl für Kartographie, Technische Universität München, Arcisstraße 21, 81033 München, liqiu.meng@bv.tum.de

⁴ Prof. Dr.-Ing. Uwe Stilla, Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München, Arcisstraße 21, 81033 München, stilla@bv.tum.de

2.1 Aufnahme

Im ersten Schritt der Datenintegration werden die 3D Modelldaten direkt über eine XML Schnittstelle in die Datenbank überspielt (Punkt ①). Für die aus einer Videosequenz stammenden IR-Sensordaten findet mit einer identischen Videosequenz auf Grundlage der realen Kameratrajektorien im 3D Modell eine simulierte Überlagerung statt. Dadurch ist eine Zuordnung der später entzerrten Textur auf das Modell gegeben. Um die Auflösung der Textur aus der schräg aufgenommenen Videosequenz zu erhöhen werden nur der Bildbereich mit der höchsten Auflösung für eine zusammengesetzte IR-Textur verwendet und der Datenbank zugeführt (Punkt ②).

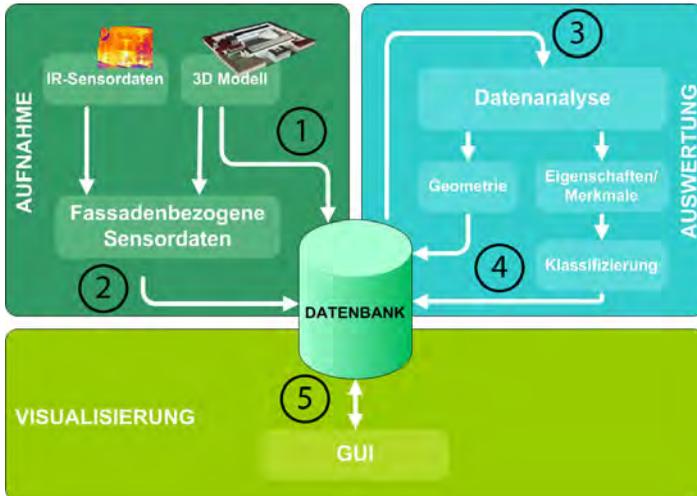


Abb.1 : Flussdiagramm der Arbeitsschritte

2.2 Auswertung

Im Bereich der Auswertung können die abgelegten Texturdaten für die weitere Verarbeitung ausgelesen werden (Punkt ③). Nach vollständiger Datenanalyse, können die gewonnenen Informationen in die Datenbank zurückgeführt werden, so dass geometrisch wie auch semantische Informationen aufgenommen werden können. Zwei Beispiele verdeutlichen die unterschiedlichen Arten zur Informationsgewinnung. Bei einer Kantendetektion können Fenster und andere geometrische Elemente erkannt werden. Bei Ermittlung von markanten Wärmeunterschieden kann eine Aussage über die Eigenschaft, bzw. über die Merkmale getroffen werden, die für die spätere Klassifizierung aus kartografischer Sicht von Interesse sind (Punkt ④).

2.3 Visualisierung

Die Ergebnisse aus den vorangegangenen Arbeiten werden im letzten Schritt der Projektphase in einer dreidimensionalen Umgebung in Echtzeit visualisiert. Zusätzlich wird eine Schnittstelle für den Zugriff auf die Datenbank bestehen, die die Darstellung von Sachdaten über eine GUI (Graphical User Interface) erlaubt.

Desweiteren soll die Möglichkeit bestehen, einen Texturwechsel bei den Fassaden zu ermöglichen. Dies erfordert einer Zuordnung mehrerer Texturen für eine Fassade und deren Datenhaltung innerhalb bzw. außerhalb der Datenbank (Punkt ⑤).

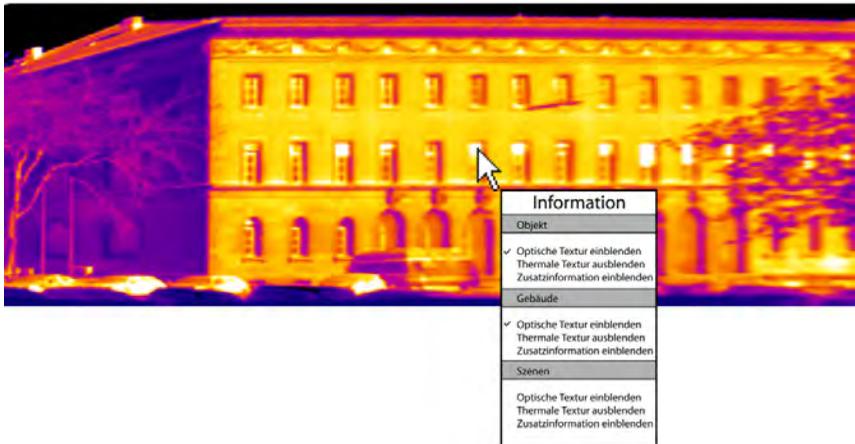


Abb. 2 : Interaktiver Texturwechsel

3. Datengrundlage

Ein zentraler Teil dieser Arbeit ist es, aus unterschiedlichen Datenbeständen eine 3D Geodatenbank aufzubauen. Die vorhandene Datengrundlage für unsere Arbeit bestehen aus amtlichen Katasterdaten, 2.5D Shape Daten des städtischen Vermessungsamtes, einer im Rahmen einer Diplomarbeit durchgeführten Vermessung des Stammgeländes der Technischen Universität im 3D Studio Max Format (FIRSCHING et al., 1999) und den Bilddatenströmen aus zwei IR Kameras sowie einer Kamera im sichtbaren Wellenbereich. Zur Positionsbestimmung für die aufgenommenen Bilddaten wurde das Bildsignal mit einem GPS-Empfänger zeitlich synchronisiert. Weiterhin lieferte das Meteorologische Institut der TU München Wetterdaten für das Zeitfenster der Aufnahme. Die zur Verfügung gestellten Daten enthalten Sonneneinstrahlungsparameter die erst dadurch eine Temperaturkorrektur der IR-Bilder erlauben. Wie in HOEGNER et al., (2006) dargestellt, kamen zwei Infrarotkameras mit jeweils unterschiedlichen Wellenlängenbereichen zum Einsatz. Die IR-Aufnahmen decken somit den Bereich von thermalem (8-12µm) und mittleren (3-5µm) Wellenlängebereich ab. Nach der Umwandlung des Videomaterials wurden die Ergebnisse als 16bit Integer Werte und als 8 bit Grauwertbilder abgespeichert.

4. Datenimport

Aufgrund der unterschiedlichen Datenbestände ist es notwendig, ein Datenaustauschformat zu nutzen, was frei von Beschränkungen ist. D.h. es muss die Möglichkeit gegeben werden eine eigene Auszeichnungssprache (Markup Language) zu formulieren. Unter einer Auszeichnungssprache versteht man die Formulierung der Daten und auch Verfahren, die zur Verarbeitung dieser Daten notwendig sind. Diese Merkmale einer Markup Language finden sich in der vom W3C definierten XML-Sprache wieder. Dadurch wird es ermöglicht, die unterschiedlichsten Geometrie- und Sachdaten für eine Datenbank (DB) zu importieren.

Der grundlegende Aufbau von XML besteht aus einer Document Type Definition (DTD) und dem eigentlichen XML-Schema. Die DTD beinhaltet den Prolog über die vorgegeben Einschränkungen für Elemente, Attribute und Content-Modelle. Diese können sowohl innerhalb als außerhalb des XML-Schemas stehen und dienen dem XML-Prozessor für die Interpretation seines XML-Schemas.

Folgendes Beispiel zeigt eine Dokumenten-Type-Definition (DTD) Datei. Jede Zeile stellt eine Element-Deklaration dar, die für jedes Element einen Namen und ein Content-Modell definiert:

```
<!ELEMENT Gebaeude (Dach)*>
<!ELEMENT Gebaeude (Gebaeudeteil)*>
<!ATTLIST Gebaeude id CDATA #REQUIRED>
<!ELEMENT Gebaeudeteil (Fassadenteil)*>
<!ATTLIST Gebaeudeteil id CDATA #REQUIRED>
<!ELEMENT Fassadenteil ((Textur)*, Fass_Koordinate,...)>
<!ELEMENT Textur (IR_Rohdaten, IR_Bild, SB_Bild, TexturKoordinate)>
...

```

Das XML Dokument dazu zeigt die Darstellung im XML-Schema. Jedes „Tag“ (<...>) wurde vorab in der DTD definiert und findet sich in der XML Notation mit einem Anfang-/ und einem End-Tag wieder. Dadurch ergibt sich eine gute Lesbarkeit des Quellcodes.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<!DOCTYPE Gebaeude SYSTEM „Gebaeude.dtd“>

<Gebaeude>
...
<Gebaeudeteil id="1">
...
<Fassadenteil id="1">
...
  <Textur>
    <IR_Rohdaten>// Projekt/IR_Roh/100.txt</IR-Rohdaten>
    <IR_Bild>//Projekt/IR/100.jpg</IR-Bild>
    <SB_Bild>//Projekt/SB/100.jpg</SB-Bild>
    <TextureKoordinate DEF="TUM_001-TEXCOORD" point="2.1 0.9, 0.00 12.0, ...
      0.8 0.0, 2.9 0.9, "/>
  </Textur>
  <Fass_Koordinate>
    <Koordinate DEF=" TUM_001-COORD" point="16.0 0.0 -67.0, -38.0 0.0 57.0,...
      -16.0 0.0 67.0, 38.0 0.0 -58.0, "/>
    <Normal vector="0.0 1.0 0.0 "/>
  </ Fass_Koordinate >
  <Fehlfläche>75</Fehlfläche>
...
</Fassadenteil>
...
</Gebaeudeteil>
...
</Gebaeude>

```

Unser Ansatz ist nun, die Nutzung der XML Notation für den Datenimport von geometrischen Daten, Texturen und deren Merkmalskennzeichen. Unter Merkmalskennzeichen sind alle zukünftigen Elemente zu verstehen, die aus den entzerrten IR Bildern extrahiert werden können. Diese stammen aus Kantendetektionen oder erkennbaren Temperaturmerkmalen. Die Resultate sind georeferenzierte Flächen (z.B. Fenster), Linien (z.B. Fachwerkstruktur) und Punkte (z.B. Wärmeleck), die für den Import in die Datenbank zur Verfügung stehen sollen. Dadurch bedingt gehen unsere Bemühungen in der Entwicklung eines Datenimportformates in Richtung der XML Notation.

Existierende Datenaustauschformate, wie beispielsweise das von OGC ins Leben gerufene CityGML Format, unterstützen für ihr Gebäudemodell nur eine Textur pro Fläche (KOLBE et al., 2005). Inwieweit für unser Konzept die Integration mehrerer Texturen pro Oberfläche aus Thermalbildern sowie Bildern aus dem sichtbaren Bereich möglich ist, muss noch untersucht werden.

5. Datenbankansatz

Für die geplante Verwaltung einer Bildbibliothekenstruktur aus den IR-Rohdaten, entstehen ab dem Moment der vorliegenden entzerrten Teilergebnisse für das Datenbankmanagementsystem (DBMS) die Aufgaben des Datenabgleichs, der Normalisierung und der Anfragestellung.

Für die Analyse der Texturinformationen der Oberflächen ist zu untersuchen, inwieweit Unterschiede im Ergebnis entstehen, wenn statt der ursprünglichen, aus den IR-Bildern entstandenen Teilt Texturen nur die aus ihnen erzeugte Endtextur für die Weiterverarbeitung verwendet wird. Daraus ergeben sich unterschiedliche Leistungsanforderungen der Datenhaltung und der Speicherung.

Weiterhin muss das DBMS Auskünfte über die Qualität der Bilder, die Texturvollständigkeit von Gebäuden und die meteorologische Aufnahmesituation liefern.

Zum jetzigen Forschungsstand favorisieren wir für die Datenhaltung der zukünftigen Fassadentexturen das schnellere Dateisystem anstelle der Binary Large Object (BLOB) Implementierung in einer Datenbank. Als BLOB werden Datenfelder bezeichnet in denen große Mengen, für eine DB, unstrukturierte binäre Daten gespeichert werden können. Auf Grund der fehlenden Verfügbarkeit von Operationen stellen sie aber keinen Datentypen dar. Der Vorteil des Dateisystems liegt in der Speicherung der relativen Dateipfade. Nachteilig ist der Bedarf einer Anwendungslogik, da der Dateiname aus der DBMS geholt und die Datei außerhalb des DBMS interpretiert werden müsste (STONEBRAKER & MOORE 1999).

Für die spätere Interpretation der abgelegten Texturen im Dateisystem stellt dies keine Schwierigkeit dar, da diese Aufgabe die eingesetzte Visualisierungssoftware übernimmt.

Weiterhin wird die Entwicklung der Datenhaltung in einem objektrelationalen DBMS unternommen. Dies ermöglicht eine Abfrage von komplexen Daten bei ausreichender Sicherheit. Nachteilig würde sich nach STONEBRAKER & MOORE (1999) der langsame Zugriff auf große Datenmengen und die nichttriviale Aktualisierung äußern.

Unser Ansatz sieht für das semantische Datenbankmodell eine Klassenhierarchie mit Aggregation vor. Die Attribute der Objektklassen beschreiben das Gebäude von seiner Gesamtheit bis auf die Fassadeneinzelflächen. Ein Gebäude kann hierbei aus mehreren Teilgebäuden, die sich wiederum aus einer Anzahl von Fassadenteilen zusammensetzt, bestehen.

Die geplante Klassenhierarchie sieht wie folgt aus:

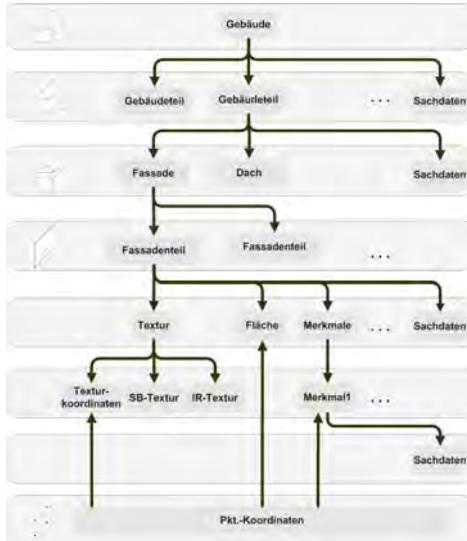


Abb. 3 : Klassenhierarchie mit Aggregation

Durch die Klassenhierarchie (IS-A-Beziehung) des Gebäudes lassen sich unterschiedliche Informationen über Geometrie- und Sachdaten für die Klassen zuweisen. Wie beispielsweise eine Postadresse für das gesamte Gebäude, unterschiedliche Höhen bei Gebäudeteilen oder Materialeigenschaften für Fassadenteile. Dabei erben grundsätzlich alle Objektklassen die Informationen der übergeordneten Objektklassen.

Im Bereich der Aggregation (PART-OF-Beziehung) entsteht eine netzartige Strukturierung aufgrund der Zuordnung identischer Punkte für angrenzende Fassadenflächen. Dadurch gewährleistet die Aggregation eine redundanzfreie und atomare Datenhaltung.

6. Texturanalyse

In der Datenbank besteht besonderes Interesse an den An-/Abfragemöglichkeiten von Sachdaten bezogenen Texturinformationen bzw. -metadaten. Darunter fallen beispielsweise die Texturvollständigkeit oder die oben schon erwähnte Qualität des Bildmaterials.

Wie schon von HOEGNER et al. (2006) diskutiert, wurden bei den IR Kameras nur kleine Öffnungswinkel von 20° verwendet. Dadurch ergeben sich wie in HOEGNER et al. (2006) in Abb. 6 und 7 dargestellt, unvollständige Texturen für die Fassadenteilstücke.

6.1 Texturvollständigkeit

Um Texturen in der Datenbank zu verwalten müssen sie, wie schon im Kapitel Datenbankansatz erwähnt, entweder mit einer Pfadangabe auf ein Dateisystem referenziert werden oder als BLOB zur Verfügung stehen. Die Abfragemöglichkeit von Informationen über die Textur ist aber damit noch nicht gegeben. Daher müssen vorab Informationen aus den entzerrten Texturen detektiert bzw. erfasst, und zur Verfügung gestellt werden.

Zwei Möglichkeiten sollen hier nur kurz vorgestellt werden:

Zum einen können in der entzerrten Textur entlang der fehlenden Bereiche Gauß-Krüger Koordinaten manuell abgegriffen und der Flächenwert durch Berechnung bestimmt werden. Diese Information wird in den Sachdatenbestand der objektrelationalen Datenbank aufgenommen, und mit dem entsprechenden Flächeninhalt der Modelfassade verglichen.

Zum anderen gäbe es die Möglichkeit zusammenhängende Pixelfelder mit einem vordefinierten Pixelwert für die entsprechenden Leerflächen zu erfassen. Dieser Vorgang ist leicht zu automatisieren und repräsentiert den fehlenden Informationsgehalt der Textur. Um eine Aussage über den Flächeninhalt machen zu können, verlangt es zusätzlich der Kenntnis der Pixelgröße auf der Fassade.

6.2 Texturqualität

Ein weiteres Kriterium bei der Archivierung von Texturen ist der zu sichernde Auswertestand. Die IR-Bildwerte für die Textur werden wie schon von HOEGNER et al. (2006) beschrieben bei einer Bildsequenz aus vielen einzelnen Rohbildwerten zusammengestellt. Bei der Zusammenstellung kommt es zu mehrfacher Überlagerung gleicher Bildpartien, die eine unterschiedliche Gewichtung für die Kalkulierung des mittleren Bildwertes erfahren. Würde bei einer späteren Messkampagne zusätzliches Bildmaterial einfließen, müsste die Gewichtung aus der ersten Messkampagne bekannt sein. Diese Information ließe sich bei einer auflösungsverdichteten IR-Textur in der Datenbank ohne weiteres aufnehmen.

7. Diskussion

Der Bericht zeigt auf, dass durch die Thematik des DFG-Projektes bis dato viele Fragen noch nicht abschließend beantwortet sind. So ist der Einsatz des x3d-Formates als Datenimportformat ebenso denkbar wie das schon erwähnte CityGML-Format, wenn multiple Texturen an Fassadenflächen in Zukunft unterstückt werden würden.

Beim letzten Projektschritt der Visualisierung ist die Frage welche Software für die grafische Benutzeroberfläche (GUI) zum Einsatz kommt noch offen. Dort stünden Landexplorer (DÖLLNER & BAUMANN, 2005) und Quest3D zur Auswahl, um nur einige interessante Softwareprodukte zu nennen.

8. Ausblick

Die ersten Schritte der Datengewinnung sind abgeschlossen. Nun geht es in den nächsten Schritten um den Import und die Datenhaltung innerhalb einer objektrelationalen Datenbank. Neben der 3D-Visualisierung ist auch eine Symbolisierung von klassifizierten Merkmalskennzeichen angedacht. Dabei könnten für zweidimensionale Kartengraphiken, die z.B. eine Fassadenfläche repräsentieren eine Reihe von Multivarianten-Signaturen sowie Animationsdiagramme zum Einsatz kommen.

9. Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten sind Teil des DFG-geförderten Forschungsprojektes „Enrichment and Multi-purpose Visualization of Building Models with Emphasis on Thermal Infrared Da-

ta“, das im Rahmen des DFG-geförderten Bündelprojektes „Interoperation of 3D Urban Geoinformation (3DUGI)“ bearbeitet wird.

Die Autoren danken FGAN-FOM, Abteilung Optronische Systemanalyse, Ettlingen, für die Bereitstellung des Messfahrzeuges mit IR-Kameras und der Unterstützung bei der Messung.

10. Literatur

- DÖLLNER, J. & BAUMANN, K., 2005: Geländetexturen als Mittel für die Präsentation, Exploration und Analyse komplexer räumlicher Informationen in 3D-GIS. In: A. Zipf, V. Coors (Eds.). 3D-Geoinformationssysteme, Wichmann Verlag, 217-230.
- FIRSCHING, A., MOLDAN, C. & RUMPFINGER, H., 1999: Großmaßstäbige Planerstellung sowie Konzeptentwicklung und Realisierung eines wirklichkeitsnahen dreidimensionalen Gebäudemodells, Diplomarbeit, TU München.
- HAEBERLING, C., 2004: Topografische 3D-Karten. Thesen für kartografische Gestaltungsgrundsätze. Dissertation, Institut für Kartographie der ETH Zürich.
- HOEGNER, L., KUMKE, H., MENG, L. & STILLA, U., 2006: Konzept zur Automatischen Texturierung von Gebäudemodellen mit Thermographiebildern, Jahrestagung DGPF, Berlin (im gleichen Band).
- KOLBE, T., GRÖGER, G. & PLÜMER, L., 2005: CityGML – Interoperable Access to 3D City Models. In: van Oosterom, P., Zlatanova, S., Fendel, E.M. (Hrsg.): Geoinformation for Disaster Management. Proc. of the 1st International Symposium on Geoinformation for Disaster Management', Delft, The Netherlands, March 21-23, 2005. Springer
- NIENHAUS, M. & DÖLLNER, J., 2003: Edge-Enhancement - An Algorithm for Real-Time Non Photorealistic Rendering. International Winter School of Computer Graphics, Journal of WSCG, 11(2):346-353.
- SHI, W. & MENG, L., 2006: Some ideas for integrating multidisciplinary spatial data. Hampe, M., Sester, M. and Harrie, L. (eds.): ISPRS Vol. XXXVI. ISPRS Workshop – Multiple representation and interoperability of spatial data. Feb. 22-24, 2006, Hannover, 30-35.
- NIENHAUS, M. & DÖLLNER, J., 2003: Edge-Enhancement - An Algorithm for Real-Time Non Photorealistic Rendering. International Winter School of Computer Graphics, Journal of WSCG, 11(2):346-353.
- STONEBRAKER & MOORE, 1999: Objektrelationale Datenbanken. Die nächste große Welle, Carl Hanser Verlag München Wien, S. 180
- STROTHOTTE, T. & SCHLECHTWEIG, S. 2002: Non-Photorealistic Computer Graphics: Modeling, Rendering and Animation. Morgan Kaufman.

Eine kombinierte topographisch-thematische Karte der Centauri und Hellas Montes (Mars)

HARTMUT LEHMANN¹, STEPHAN GEHRKE¹, STEPHAN VAN GASSELT², JÖRG ALBERTZ¹, GERHARD NEUKUM² und das HRSC Co-Investigator Team

Zusammenfassung: Seit Januar 2004 sendet die ESA-Raumsonde Mars Express eine Fülle an atemberaubenden multispektralen digitalen Bilddaten in hoher Auflösung und mit 5facher Stereoabdeckung von der Marsoberfläche. In den vergangenen Jahren hat die „High Resolution Stereo Camera“ (HRSC) an Bord der Raumsonde Mars Express mehr als die Hälfte der Marsoberfläche erfasst, wobei 27% der aufgenommenen Daten mit einer Auflösung besser als 20 m/Pixel vorliegen. HRSC Bilddaten werden systematisch in unterschiedlichen Verarbeitungsstufen prozessiert. Basierend auf diesen Daten wurden bereits verschiedene großmaßstäbige topographische und thematische Karten hergestellt. Das Standard-Kartenwerk für die Mars Express Mission ist die „Topographic Image Map Mars 1:200,000“, welche die Marsoberfläche in 10 372 einzelne Kartenblätter abbildet.

Die im östlich des Hellas Impaktbeckens gelegenen Restbergmassive der Centauri and Hellas Montes Region, bei 97° Ost und 38° Süd, werden als Zeugen impaktbezogener Krustenhebung und Ejectamaterial interpretiert. In einem Teilgebiet der Region wurde im Rahmen von aktuellen Untersuchungen möglicher Kriechstrukturen eine stark degradierte Caldera entdeckt. Während der vulkanischen Aktivitätsphase wurde vermutlich weiträumig Material in der Centauri und Hellas Montes Region abgelagert, welches zur Bildung von Kriechstrukturen beigetragen hat. Es ist wahrscheinlich, dass Ausflussaktivität in der nahen Umgebung mit Aufschmelzungsprozessen infolge des Vulkanismus im Zusammenhang stehen. Es sind deutliche Hinweise erkennbar, dass Flanken der vulkanischen Struktur später kollabierten und die Umgebung mit Hangrutschungen und Lawinen überdeckte.

Das thematische Kartenblatt des Centauri und Hellas Montes Gebietes erstreckt sich über einen Darstellungsbereich von 95°00' bis 97°50' östlicher Länge und 36°45' bis 39°45' südlicher Breite. Die Karte wurde in Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Berlin-Adlershof, verantwortlich für die photogrammetrische Verarbeitung der Bilddaten, dem Institut für Geowissenschaften, Fachrichtung Planetologie und Fernerkundung, Freie Universität Berlin, für die geowissenschaftliche Interpretation und dem Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik der Technischen Universität Berlin realisiert, welches die kartographische Umsetzung dieses Projekts koordiniert und ausgeführt hat. Mit dem vorliegenden Kartenblatt des Centauri und Hellas Montes Gebietes präsentieren die Autoren ein weiteres Gestaltungsbeispiel aus dem Bereich der planetaren Kartographie.

¹ Technische Universität Berlin, Geodäsie und Geoinformationstechnik, Sekr. H 12, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin, E-Mail: {stephan | h.lehmann | robert | albertz}@igg.tu-berlin.de

² Freie Universität Berlin, FR Planetologie und Fernerkundung, Malteserstr. 74-100, 12249 Berlin, E-Mail: {vgasselt | gneukum}@zedat.fu-berlin.de

1 Introduction

Since recent decades the exploration of our solar system enjoys a steadily increasing scientific and public interest. *Mars Express* is one of several space missions being planned or in operation at this stage. With its entry into the operational orbit in January 2004, *Mars Express*, which is the first European Space Mission ever, bestows us an abundance of spectacular data of Mars (NEUKUM et al. 2004). For cartographic purposes however the unprecedented wealth of spectacular multi-spectral digital image data of high resolution as well as systematic stereo coverage of the Martian surface are of substantial interest. In the scope of this recent large-scale mapping program the German *High Resolution Stereo Camera* (HRSC) on board of *Mars Express* has been especially designed to meet photogrammetric and cartographic requirements. As a necessary basis for precise topographic mapping the data proved to be well suited for the derivation of Digital Terrain Models (DTM) as well as color ortho-image mosaics. During the past two years, the HRSC has covered more than half of the Martian surface, whereas 27% of the data already obtained is provided in resolutions better than 20 m/pixel. HRSC images are processed systematically to various data levels. Based on these products, high-quality large-scale topographic and thematic image maps are generated. The *Topographic Image Map Mars 1:200,000* is the standard map series for the *Mars Express* Mission, which represents the surface of Mars in more than 10,000 individual map sheets.

Basic principle of the *Topographic Image Map Series 1:200,000* is a well designed cartographic concept developed at the Technische Universität Berlin in close cooperation with colleagues from German Aerospace Center (DLR), Institute of Planetary Research, Berlin. In addition to the need for precise high-quality topographic image maps a continuously increasing requirement for thematic maps is evident. At first instance thematic map activities are presently focused on the preparation of geological and geomorphological maps. For realizing these challenges the cartographic software package *Planetary Image Mapper* (PIMap) which has been developed at Technische Universität Berlin, again proved its operational capability.

With the map of the Centauri and Hellas Montes area the authors present a new design in high-quality thematic cartography which benefits from the quality of HRSC images and DTMs as well as the sophisticated cartographic concept and the flexibility of PIMap.

2 Cartographic Concept

In planetary cartography maps are usually based on image data. In the case of *Mars Express* color orthoimage mosaics as a result of photogrammetric processing (e.g. SCHOLTEN et al., 2005) have been used predominantly.

A sophisticated cartographic concept was developed and forms the basis for the topographic image map series, the *Topographic Image Map Mars 1:200,000*, as well as for thematic maps (LEHMANN, H., 1996, ALBERTZ, J. et al., 2004). The Martian reference body for planimetry is a rotational ellipsoid as defined by the International Astronomical Union (IAU) which is the *Mars IAU 2000* ellipsoid. An areoid (Martian geoid) is defined as the topographic reference surface for heights. Equal-area map projections are used for compiling the map sheets. Because of its useful mathematical and graphical properties, the *Sinusoidal* projection is applied to map sheets between 85° north and 85° south. For mapping the polar regions the *Lambert Azimuthal* projection was selected. In principle, the cartographic concept perfectly meets all requirements for both mapping features and regions of special interest as well as particular HRSC orbits that don't fit with the sheet line system. Map sheets of the *Topographic Image*

Map Mars 1:200,000 series easily can be subdivided into quarters or sixteenth for maps in scales 1:100,000 or 1:50,000.

The software package *Planetary Image Mapper* (PIMap) comprises all cartographic processing steps such as compilation and nomenclature of the map content including contour lines, generation and placement of graphical elements, e.g. naming of surface features, including the map frame and all necessary marginal elements for every single map sheet.

PIMap Input Data:

- Initialization file (mandatory!)
- Orthoimage mosaic
- Digital Terrain Model (DTM)
- Planetary features: topographic names and landing sites
- Map series definitions

More details with regard to the topographic map production process with PIMap are presented in the companion paper by GEHRKE et al. (2006c). Whereas only few post processing steps are required to generate high quality topographic maps, at present the integration of thematic data is mainly an interactive process.

3 The Centauri and Hellas Montes Area

The Centauri and Hellas Montes assembly of remnant massifs, located at 97° east and 38° south, have been interpreted as crustal uplifts and ejected material from the Hellas impact event in early Martian history.

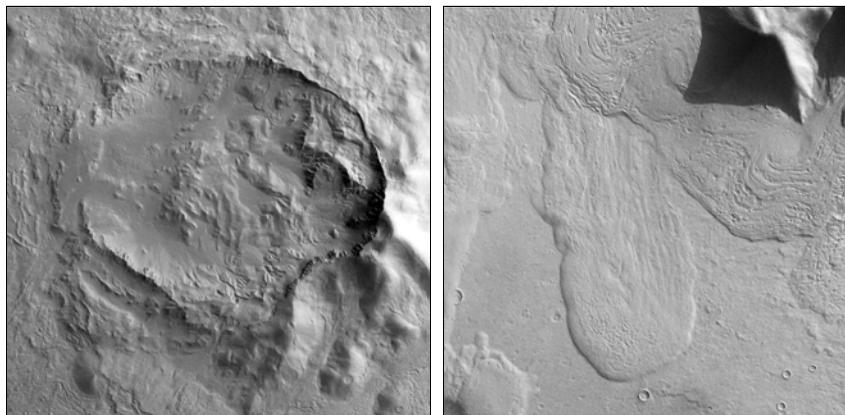


Fig. 1. Left: HRSC Nadir scene from the eastern Hellas Montes area. Degraded caldera complex, orbit 2510, image width is 50 km. Right: Debris tongue, image width is 23 km.

Subsequent mechanisms led to formation of adjacent lobate debris aprons which are considered to be composed of a debris-ice mixture with rheological similarities to terrestrial rock

glaciers. Recent investigations of this working area resulted in the discovery of a degraded caldera complex, formerly been recognized as impact crater structure. The discovery of this collapsed caldera feature bears new implications on the history of the Eastern Hellas rim assembly. The region was covered in HRSC orbits 2510, 2466 and 0506.

Especially the recently obtained data from orbits 2510 and 2466 provided highly detailed insights into the small-scale morphology of this area.

3.1 Geologic and Geomorphologic Setting

The Eastern Hellas Planitia area is one of the locations on Mars which have been discussed by many scientists in a wide field of geologic and geomorphologic topics. Landforms and geology of that area are primarily related to the Hellas Planitia impact event which occurred early in Martian history and formed one of the largest impact basins in the solar system (e.g., GREELEY and GUEST, 1987; TANAKA et al., 1992). Subsequently, volcanic processes and resurfacing of landforms connected to several volcanic edifices shaped the area (e.g., GREELEY and CROWN, 1990; CROWN, 1991; CROWN and GREELEY, 1993). Outflow activity connected to the Dao, Niger and Harmakhis Valles (PRICE, 1992; BLEAMASTER and CROWN, 2004) as well as the contributory Reull Vallis caused ongoing resurfacing and transport of large volumes of water and debris (LETH and TREIMAN, 1997; MEST and CROWN, 2001).

Within these settings, the most prominent landforms of the Eastern Hellas assemblages are characterized by smoothly shaped isolated complexes of remnant massifs with a relief of several hundreds to thousand metres which are interpreted as uplifted crust or ejected material connected to the Hellas impact event (GREELEY and GUEST, 1987). These remnants are situated among large complexes of coalescing debris aprons indicative of viscous creep and deformation. These debris aprons are interpreted as possible rock glacier analogues (SQUYRES, 1978, 1979; SQUYRES and CARR, 1986; CROWN and STEWART, 1995; CROWN et al., 2002; VAN GASSELT et al., 2002; MANGOLD, 2003). Rock glaciers and associated landforms on Earth are connected to alpine and high-latitude periglacial environments (WAHRHAFTIG and COX, 1959; HAEBERLI, 1985; VITEK and GIARDINO, 1987; BARSCH, 1987, 1988). They represent mass-transport systems composed of mixtures of debris and ice in various amounts. Their possible analogues on Mars have been discussed with a focus on their origin and amount of ice and/or water as well as the incorporated debris. The global distribution of debris aprons has been shown on Viking data (SQUYRES, 1978, 1979). Highest-resolution data provided by the Mars Orbiter Camera experiment on Mars Global Surveyor (MALIN et al., 1992) gave further insights into the style of emplacement, and the textural inventory. Topographic profiles derived from Viking stereo data as well as topographic data provided by the Mars Orbiter Laser Altimeter onboard Mars Global Surveyor (SMITH et al., 2001) furthermore showed convex-upward profiles indicating stresses and deformation values similar to terrestrial glacial systems (SQUYRES, 1978; MANGOLD et al., 2002).

Among these more or less spatulate populations of debris aprons, a particular landform located just north of the Reull Vallis and east of the Harmakhis outflow channel head looks slightly different in terms of (a) general shape, (b) textural inventory and (c) morphometry. Emplacement styles ranging from rock glaciers, debris avalanching and debris flows have been discussed recently (CROWN et al., 1992; BARATOUX et al., 2002; DEGENHARDT and GIARDINO, 2003; VAN GASSELT et al., 2006). There are few textural and morphometric hints that an origin as debris avalanche is plausible although contemporary or later creep deformation assisted by interstitial ice has to be considered also. It is interpreted that the 35-kilometer depression in the North is not related to an impact event as interpreted in earlier maps (GREELEY and GUEST, 1987; CROWN et al., 1992) but is connected to a highly-degraded vol-

canic edifice. Size ratios and rim characteristics differ significantly from common impact craters. Large landslide deposits in the west and south of the caldera indicate collapse of the western rim during multiple events.

This interpretation has several implications on the geo-morphology of the eastern Hellas Planitia area. The Harmakhis Vallis head is situated directly west of the caldera complex and its formation can directly be associated with volcanic activity in this area. Furthermore, sources for debris incorporated into the debris apron are probably connected to early volcanic activity and possible ash-flow deposits. Interstitial ice then caused ongoing deformation and remobilization with the consequence that surfaces are generally considered young as suggested by crater-size frequency data (BARATOUX et al., 2002; VAN GASSELT et al., 2005).

3.2 Geologic and Geomorphologic Mapping

In contrast to geologic maps, geomorphologic maps and a combination of both consist of a two-dimensional representation of various surface units which may be similar in lithologies, i.e., composition, but different in terms of morphology, shape and texture. Image data from the HRSC instrument (NEUKUM, G. et al., 2004) as well as highest-resolution data from the Mars Orbiter Camera (MALIN et al., 1992) and THEMIS instruments (CHRISTENSEN et al., 2004) have been utilized to perform mapping in this area in order to show various landslide units in connection with massifs from which they are derived. It is obvious that different landslide units as well as remnant massifs consist of identical lithologies, however, different stages of emplacement and therefore different superpositions have to be pointed out clearly in order to understand the genetic evolution of the Hellas/Centauri Montes areas. For mapping, HRSC based stereo data has been used to generate red-cyan anaglyphs. The parallaxes caused by stereo angle of 18.9° between HRSC nadir and first stereo-channel significantly improved separation of various units and helped to understand relative positions of individual units.

Higher resolution data have been mainly utilized for delineating unit boundaries more precisely. Geomorphologic definition of mass-wasting units differentiated for the map project:

- **Lobate Debris Apron (lda):** debris material with large volumes of interstitial ice, deformation similar to terrestrial rockglaciers
- **Debris Tongue Units (dt):** remobilized landslide material connected to caldera collapse
- **Harmakhis and Reull debris infill (hrf + hrv2):** erosional debris and landslide material filling the Harmakhis and Reull Valles channel systems. Partly derived from the Centauri Montes, partly derived from caldera collapse
- **Intra-Caldera debris (icd):** erosional debris and landslide material from the interior of the caldera complex
- **Reull Vallies infill (rvf):** debris and wall rock material of the Reull Vallis unit
- **Centauri Montes debris unit (undivided) (cd):** erosional debris from the Centauri Montes complex
- **Margins of Centauri Montes debris units (cdm):** lobate shaped debris units connected with margins of the Centauri Montes debris unit
- **Crater-impact ejecta (e):** ejecta material, partly incorporated into landslide deposits
- **Crater infill (cf):** concentric-crater fill units and crater floor deposits
- **Debris unit (du)**

4 Map Sheet Layout

For the generation of this thematic map the cartographic software system, the *Planetary Image Mapper* (PIMap) has proven to be an essential and valuable map production tool. Due to the flexibility of the product center point, map dimensions, and scales can be freely defined thus providing a remarkable cartographic freedom in constructing maps in different projections, sheet lines (quadrangles), scales and dimensions.

Following the map series *Topographic Image Map Mars 1:200,000* as a guideline our new geomorphologic map project is mainly based on its technical specifications concerning reference body for planimetry, reference surface for heights, map projection and many aspects with regard to the grid systems and nomenclature.

The work area on which our interest is focussed has been mapped out between 95° to 100° Eastern longitude and 36° to 40° Southern latitude. From the available HRSC data covering that region, orbit 2510 has been chosen for map generation.

It is intended to render the thematic content according to well established cartographic experience with respect to an easy readable and well-defined representation. In mapping processes by means of a map series, with a necessarily fixed sheet lines system, consequently, the appearance of relevant topographic features of special interest are often affected by those sheet lines. In contrast to map sheets of map series in general, the map project of the Centauri and Hellas Montes area is laid out as an individually defined map sheet. According to the coverage of recently obtained data of orbit 2510 and a variety of pragmatic aspects as well, the map scale was defined to be 1:300 000.

This is certainly a compromise considering the fact that the work area has to be presented in one individual sheet for optimal overview in the distinctive style of the layout features of the standard map series *Topographic Image Map Mars 1:200,000*. Considering all design aspects and technical specifications this geologic map project of the Centauri and Hellas Montes area results in a map surface spread from 95°00' to 97°50' Eastern longitude and 36°45' to 39°45' Southern latitude.

Presentation of the geomorphologic context is arranged in such a way that only selected thematic features are depicted within the map surface by means of discrete color. As is common practice in thematic mapping the remaining areas, not relevant for geomorphologic interpretation, are not assigned as a further class in the interpretation key. Instead of that it was decided to represent those areas by the topographic color imagery resulting in a combined topographic-thematic map.

5 Conclusion and Outlook

The wealth of challenging data acquired by HRSC since January 2004 still fascinates scientists and the public as well. Nearly 30% of HRSC imagery reveals spatial resolution better than 20 m/pixel. Since then various image maps have been generated mainly intended for scientific purposes within the HRSC Science Team. Most of the maps already produced are map sheets in the range of the standard map series *Topographic Image Map Mars 1:200,000* or derivatives with different sheet lines or/and scale. At the present time however a steadily increasing demand for thematic maps, especially geologic and geomorphologic maps, is in evidence. Current work is focused on further adjustments of PIMap which come up through requests and demands arising within the science team during the ongoing experiment. Par-

ticularly for future thematic mapping, further investigation will be concentrated on developing additional customized (tailor-made) software modules to supplement PIMap, which proved so far its reliability and performance in planetary map generation.

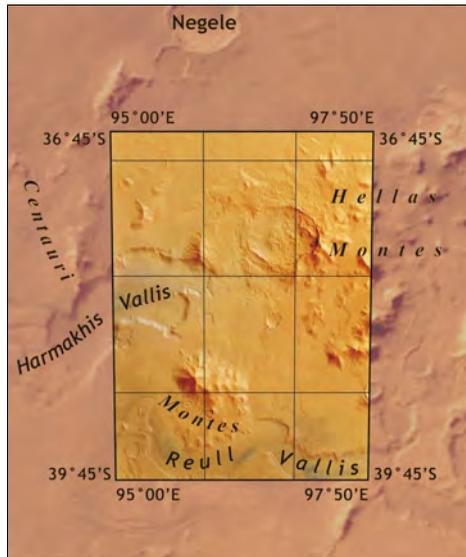


Fig. 2: Location and dimension of the topographic basis for the map project of the Centauri and Hellas Montes area in Sinusoidal projection. (Background Imagery: Viking data, adapted for presentation)

But at the same time it is implied that agreements and standardizations in geologic/geomorphologic interpretation, nomenclature and methodology for cartographic representation have to be formulated as requirements.

6 References

- ALBERTZ, J., GEHRKE, S., WÄHLISCH, M., et al., 2004: Digital Cartography with HRSC on Mars Express. The International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing, Istanbul, Vol. XXXV, Part B4, pp. 869-874.
- ALBERTZ, J., GEHRKE, S., LEHMANN, H., et al., 2005a. Precise Topographic and Thematic Maps of Planet Mars. Proceedings XXII Internat. Cartographic Conference, A Coruña.
- ALBERTZ, J., ATTWENGER, M., BARRETT, J., 2005b. HRSC on Mars Express – Photogrammetric and Cartographic Research. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 71, No. 10, pp. 1153-1166.
- BARATOUX, D., MANGOLD, N., DELACOURT, C., ALLEMAND, P., 2002. Evidence of liquid water in recent debris avalanche on Mars. Geophys. Res. Lett. 29, 60–1.
- BARSCH, D., 1987. Rock glaciers: an approach to their systematics. In: Giardino, J., Shroder, J., Vitek, J. (Eds.), Rock glaciers. Allen & Unwin, London, pp. 41–44.

- BARSCHE, D., 1988. Rockglaciers. In: Clark, M. (Ed.), *Advances in periglacial geomorphology*. Wiley, Chichester, pp. 69–90.
- BLEAMASTER, III, L. F., CROWN, D. A., 2004. Morphologic Development of Harmakhis Vallis, Mars. In: Mackwell, S., Stansbery, E. (Eds.), *Lunar and Planetary Institute Conference Abstracts*. p. 1825.
- CHRISTENSEN, P. R., JAKOSKY, B. M., KIEFFER, H. H., MALIN, M. C., MCSWEEN, JR., H. Y., NEALSON, K., MEHALL, G. L., SILVERMAN, S. H., FERRY, S., CAPLINGER, M., RAVINE, M., 2004. The Thermal Emission Imaging System (THEMIS) for the Mars 2001 Odyssey Mission. *Space Science Reviews* 110, 85–130.
- CROWN, D. A., 1991. Volcanism in the eastern Hellas region of Mars: The geology of Hadriaca and Tyrrhena Paterae. Ph.D. Thesis.
- CROWN, D. A., GREELEY, R., 1993. Volcanic geology of Hadriaca Patera and the eastern Hellas region of Mars. *J. Geophys. Res.* 98, 3431–3451.
- CROWN, D. A., PIERCE, T. L., and SCOTT C. MEST, S. B. Z. M., 2002. Debris aprons in the eastern hellas region of mars: Implications for styles and rates of highland degradation. In: *Lun. Planet. Sci. Conf. Abstracts*. Vol. 33. p. 1642, print.
- CROWN, D. A., PRICE, K. H., GREELEY, R., 1992. Geologic evolution of the east rim of the Hellas basin, Mars. *Icarus* 100, 1–25.
- CROWN, D. A., STEWART, K. H., 1995. Debris aprons in the eastern hellas region of mars. In: *Lun. Planet. Sci. Conf. Abstracts*. Vol. 26. pp. 301–302.
- DEGENHARDT, J. J., GIARDINO, J. R., 2003. Subsurface investigation of a rock glacier using ground-penetrating radar: Implications for locating stored water on Mars. *J. Geophys. Res.* 108 (E4), 17.
- GEHRKE, S., NEUKUM, G., 2005. Das Kartographische Softwarepaket „Planetary Image Mapper“ (PIMap). *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation*, 5/2005, pp. 417–422.
- GEHRKE, S., LEHMANN, H., KÖHRING, R., et al., 2006a: Iani Chaos in Three Scales – A Topographic Image Map Mars and its Subdivisions. *Lunar and Planetary Science (LPSC) XXXVII*, Houston, Paper #1325.
- GEHRKE, S., LEHMANN, H., KÖHRING, R., et al., 2006b: Large-Scale Topographic Maps of Iani Chaos, Mars. *Proceedings 5th Turkish-German Joint Geodetic Days*, Berlin.
- GEHRKE, S., WÄHLISCH, M., LEHMANN, H., ALBERTZ, J., ROATSCH, T., 2006c: Generation of Digital Topographic Maps of Planetary Bodies. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Goa, Vol.36, Part 4, Commission IV, WG IV/7
- GREELEY, R., BATSON, R.M., 1990. *Planetary Mapping*. Cambridge University Press, Cambridge.
- GREELEY, R., CROWN, D. A., 1990. Volcanic geology of Tyrrhena Patera, Mars. *J. Geophys. Res.* 95, 7133–7149.
- GREELEY, R., GUEST, J. E., 1987. Geologic map of the eastern equatorial region of mars. U.S. *Geol. Surv. Misc. Inv. Series Map-I-1802-B*.
- HAEBERLI, 1985. Creep of mountain permafrost: internal structure and flow of alpine rock glaciers. *Mitt. der Versuch. f. Wasserbau, Hydrol. und Glaziol.* Zürich 77, 142.
- LEHMANN, H., 1996: A New map Series for Planet Mars- Concept and realization of the “Topographic Image Map Mars 1:200,000”. *The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vienna, Vol. XXXI, Part B4, pp. 497-502.
- LETH, P. T., TREIMAN, A. H., 1997. Geology of the Reull Vallis Region of Mars – Evidence for Mid-Noachian sheet floods. In: *Lunar and Planetary Institute Conference Abstracts*. p. 807.
- M IPL, 2006: www-mipl.jpl.nasa.gov (accessed: June 2006).

- NASA, 2006. Planetary Data system. pds.jpl.nasa.gov (accessed: June 2006).
- NEUKUM, G., et al., 2004. The High Resolution Stereo Camera of Mars Express. ESA Special Publication SP-1240.
- PORCO, C. C., et al., 2004. Cassini Imaging Science: Instrument Characteristics and Anticipated Scientific Investigations at Saturn. *Space Science Review*, Vol. 115, pp. 363-497.
- SCHOLTEN, F., GWINNER, K., ROATSCH, T. et al., 2005. Mars Express HRSC Data Processing – Methods and Operational Aspects. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 71, No. 10, pp. 1143-1152.
- MALIN, M. C., DANIELSON, G. E., INGERSOLL, A. P., MASURSKY, H., VEVERKA, J., RAVINE, M. A., SOULANILLE, T. A., May 1992. Mars Observer Camera. *J. Geophys. Res.* 97, 7699–7718.
- MANGOLD, N., ALLEMAND, P., DUVAL, P., GERAUD, Y., THOMAS, P., 2002. Experimental and theoretical deformation of ice-rock mixtures: Implications on rheology and ice content of Martian permafrost. *Planet. Space Sci.* 50, 385–401.
- MEST, S. C., CROWN, D. A., 2001. Geology of the Reull Vallis Region, Mars. *Icarus* 153, 89–110.
- NEUKUM, G. and JAUMANN, R. and the HRSC Co-Investigator and Experiment Team, 2004. HRSC: the High Resolution Stereo Camera on Mars Express. Vol. SP-1240. ESA, Ch. 1, pp. 17–36.
- PRICE, K. H., 1992. Geologic Mapping of Part of Harmakhis Vallis Region, Mars: Evidence of Multiple Drainage Events. In: *Lunar and Planetary Institute Conference Abstracts*. p. 1107.
- SMITH, D. E., ZUBER, M. T., FREY, H. V., GARVIN, J. B., HEAD, J. W., MUHLEMAN, D. O., PETTENGILL, G. H., PHILLIPS, R. J., SOLOMON, S. C., ZWALLY, H. J., BANERDT, W. B., DUXBURY, T. C., GOLOMBEK, M. P., LEMOINE, F. G., NEUMANN, G. A., ROWLANDS, D. D., AHARONSON, O., FORD, P. G., IVANOV, A. B., JOHNSON, C. L., MCGOVERN, P. J., ABSHIRE, J. B., AFZAL, R. S., SUN, X., 2001. Mars Orbiter Laser Altimeter: Experiment summary after the first year of global mapping of Mars. *J. Geophys. Res.* 106, 23689–23722.
- SQUYRES, S. W., 1978. Martian fretted terrain – Flow of erosional debris. *Icarus* 34, 600–613.
- SQUYRES, S. W., 1979. The distribution of lobate debris aprons and similar flows on Mars. *J. Geophys. Res.* 84, 8087–8096.
- SQUYRES, S. W., Carr, M. H., 1986. Geomorphic evidence for the distribution of ground ice on Mars. *Science* 231, 249–252.
- TANAKA, K. L., D. H. S., GREELEY, R., 1992. Global stratigraphy. In: Kieffer, H. H., Jakosky, B. M., Snyder, C. W., Matthews, M. S. (Eds.), *Mars*. Univ. Arizona Press, pp. 345–382.
- USGS, 2006a: astrogeology.usgs.gov (accessed: June 2006).
- USGS, 2006b: Map-a-Planet.pdsmaps.wr.usgs.gov (accessed: July 2006)
- VAN GASSELT, S., HAUBER, E., JAUMANN, R., 2002. Morphology and Topography of Fretted Terrain at the Dichotomy Boundary in Tempe Terra, Mars: Quantitative Morphology of Slope Aprons and Mesas. In: *Lunar and Planetary Institute Conference Abstracts*, p. 1856.
- VAN GASSELT, S., HAUBER, E., NEUKUM, G., HRSC Co-Investigator Team, 2006. Origin and Nature of a Debris-Tongue in Hellas Montes, Mars. In: Mackwell, S., Stansbery, E. (Eds.), *37th Annual Lunar and Planetary Science Conference*. p. 2417.
- VAN GASSELT, S., HAUBER, E., REISS, D., SCHOLTEN, F., NEUKUM, G., The HRSC Co-Investigator Team, 2005. Slope Morphologies of the Hellas Mensae Constructs, Eastern

- Hellas Planitia, Mars. In: Mackwell, S., Stansbery, E. (Eds.), 36th Annual Lunar and Planetary Science Conference. p. 2090.
- VITEK, J. D., GIARDINO, J. R., 1987. Rock glaciers: a review of the knowledge base. In: Giardino, J. R., Shroder, J. F., Vitek, J. D. (Eds.), *Rock Glaciers*. Allen & Unwin, pp. 1-26.
- WAHRHAFTIG, A. L., COX, A., 1959. Rock glaciers in the Alaska range. *Geol. Soc. Am. Bull.* 70, 383–436.

7 Acknowledgement

The research project *Software Development and Technical Support for Cartographic Data Processing* at the *Technische Universität Berlin* is funded by the German *Bundesministerium für Bildung und Forschung*. This project is part of the research program *High Resolution Stereo Camera (HRSC) on the Mars Express Orbiter* under the guidance of Principal Investigator Prof. Gerhard Neukum, Freie Universität Berlin.

For this study, the HRSC Experiment Team of the German Aerospace Center (DLR) in Berlin has provided map-projected HRSC image and DTM data.

Dieser Beitrag wird auch auf dem Symposium der ISPRS Commission IV in Goa (Indien) im September 2006 präsentiert (IAPRS, Vol. 36, Part 4).

Segmentierung von Gebäudepunktwolken aus Laserscannerrohdaten unter Nutzung von 2D-GIS Daten

NADINE MEIERHOLD¹

Zusammenfassung: Der folgende Beitrag beschreibt ein Verfahren, das aus ungerasterten Flugzeuglaserscannerdaten 2,5D-Gebäudepunktwolken extrahiert. Grundlage ist ein in die Datenpunkte eingerechnetes TIN, auf das ein Region Growing Ansatz angewendet wird. Anschließend erfolgt eine Verfeinerung der erhaltenen Gebäude-segmente durch Nutzung von Grundrissinformationen mit dem Ziel, komplexe Gebäude in Gebäudeprimitive zu zerlegen. Die Verwendung von klassifizierten Laserscannerdaten ermöglicht eine Datenreduktion und damit die Prozessierung größerer Gebiete. Die Untersuchung der Segmentierungsergebnisse zeigt, dass Erfolgsraten von über 90% detektierter Gebäude erreicht werden.

1 Einleitung

Flugzeuglaserscannerdaten werden bereits seit einiger Zeit operationell für die Generierung von hochauflösenden und genauen digitalen Geländemodellen eingesetzt. Neben einer Vielzahl anderer Anwendungsgebiete liegt auch viel Potenzial in der automatischen Generierung von 3D-Gebäudemodellen (MAAS, 2005). Ein erster Schritt dazu ist die Segmentierung der Flugzeuglaserscannerdaten mit dem Ziel, Punktwolken zu extrahieren, die Gebäude repräsentieren.

In der Literatur sind verschiedene Ansätze zur Gebäudedetektion zu finden, von denen viele von der Modellvorstellung ausgehen, dass Dächer ebene Flächen sind. HOFMANN et al. (2003) versuchen z.B. durch Clusteranalyse ebene Dachflächen in einer in die Laserscannerpunkte gerechneten TIN-Struktur zu detektieren, während bei AXELSSON (1999) und SITHOLE & VOSSSELMAN (2003) die Segmentierung innerhalb von Profil- bzw. Scanlinien durch Untersuchung von Höhenveränderungen stattfindet.

Um bei der automatischen Interpretation der Höhendaten optimale Ergebnisse zu erzielen, ist das Einbeziehen von zusätzlichen Datenquellen kaum umgänglich (s. auch HAALA & BRENNER, 1997). Eine Möglichkeit ist die Nutzung von Grundrissen, um diese direkt mit den Höhendaten zu verschneiden (CHILTON et al., 1999) oder um Informationen über die Gebäudestruktur aus den Grundrissen zu erhalten (HAALA & BRENNER, 1997 und VOSSSELMANN & DIJKMAN, 2001). HAALA et al. (1998) versuchen, die rein geometrische Information der Laserscannerdaten durch multispektrale Informationen zu ergänzen. Aufgrund der unterschiedlichen Reflektionseigenschaften ermöglicht dies eine bessere Differenzierung von Vegetation und Gebäuden.

In diesem Beitrag wird eine Segmentierungsmethode vorgestellt, die entwickelt wurde, um für die gesamte Schweiz möglichst viele Gebäudepunktwolken automatisch zu extrahieren. Neben einer hohen Erfolgsrate resultiert daraus eine weitere Herausforderung an den Algorithmus: Die Verarbeitung einer großen Datenmenge innerhalb einer akzeptablen Zeit. Aus diesem Grund nutzt das Verfahren Zusatzinformationen in Form von vorklassifizierten Laserscannerdaten und bezieht 2D-GIS Daten in Form von Grundrissen mit ein. Die nächsten Abschnitte gehen näher auf den Algorithmus ein und zeigen Segmentierungsergebnisse für ausgewählte Testgebiete.

¹ Dipl.-Ing. Nadine Meierhold, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden, e-mail: Nadine.Meierhold@mailbox.tu-dresden.de

2 Daten

Die Befliegung der Schweiz wurde in mehreren Etappen und von verschiedenen Firmen durchgeführt. Der Bereich, aus dem das Testdatengebiet stammt, wurde mit dem Laserscannersystem ALTMS 2536 der Firma TerraPoint erfasst. Mit einer Scanrate von 43 Hz, einer Messrate von 20 kHz, einem Scanwinkel von $\pm 18^\circ$, einer Flughöhe von 915 m und mehreren Flugstreifen mit 40-50% Überlappung wurde ein mittlerer Punktabstand von 1,2 m erreicht.

Neben der Georeferenzierung führte der Datenlieferant auch eine weitgehend automatisierte thematische Klassifizierung der Daten in die Klassen *Boden*, *Vegetation* und *Kunstabauten* durch (LUETHY & STENGELE, 2005). Dabei wird jedem Datenpunkt ein Attribut zugewiesen. Die Bodenpunkte ergaben sich aus einem Filterprozess zur DTM-Generierung. Für die Differenzierung der verbleibenden Punkte in *Vegetation* und *Kunstabauten* wurden sowohl Grundrisse als auch Orthophotos verwendet. Trotz der manuellen Nachbearbeitung und Qualitätskontrolle konnten nicht alle Fehlklassifizierungen beseitigt werden. Die Klassifizierungsattribute sind für etwa 95% der Schweiz verfügbar.

3 Methode zur Segmentierung von Gebäudepunktwolken

Im Rahmen einer Voruntersuchung zeigte sich, dass mit den Klassifizierungsattributen trotz einiger Fehlklassifizierungen zuverlässigere Segmentierungsergebnisse zu erwarten sind als durch alleinige Nutzung der Grundrisse. Außerdem stehen die Daten der amtlichen Vermessung (AV), entgegen den Attributen, nur für etwa 42% der Schweiz in digitaler Form zur Verfügung (AMTLICHE VERMESSUNG, 2005). Aus diesen Gründen ist der erste Hauptschritt der entwickelten Segmentierungsmethode die Segmentierung der Laserscannerdaten mit Hilfe der Klassifizierungsattribute (Abschnitt 3.1). Die dabei extrahierten Gebäudepunktwolken werden anschließend mit Hilfe der Grundrisse in einzelne Gebäudeprimitive zerlegt (Abschnitt 3.2).

3.1 Segmentierung mit Klassifizierungsattributen

Die Segmentierung mit Hilfe der Klassifizierungsattribute, die die eigentliche Extraktion der Gebäudepunktwolken darstellt, besteht aus der Segmentierung der Kunstabautenpunkte (Abschnitt 3.1.1) und den zwei Nachbearbeitungsschritten

- Ausschluss von Segmenten
- Erweiterung von Segmenten,

die auf Fehler der Klassifizierung eingehen (Abschnitt 3.1.2).

Zunächst wird jedoch eine Datenreduktion vorgenommen, um die Laufzeit des Algorithmus zu optimieren. Da weder die Segmentierung noch die anschließende Gebäudemodellierung die Bodeninformation benötigen, werden die Bodenpunkte von vornherein von der Prozessierung ausgeschlossen. Weiterhin erfolgt eine Trennung von Punkten, die als Kunstabauten und als *Vegetation* klassifiziert wurden, da die *Vegetationspunkte* nur für die Nachbearbeitung der in den Kunstabautenpunkten gefundenen Gebäude benötigt werden.

3.1.1 Segmentierung der Kunstabautenpunkte

Ziel dieses Schrittes ist die Trennung der einzelnen in den Laserscannerdaten vorhandenen Gebäudeobjekte voneinander. In diesem Moment befinden sich ausschließlich die Kunstbau-

tenpunkte im Arbeitsspeicher, in die mit Hilfe einer Delaunay Triangulation ein TIN eingezeichnet wird. Die anschließende Segmentierung basiert auf einer Analyse der Größe der einzelnen Dreiecksmaschen.

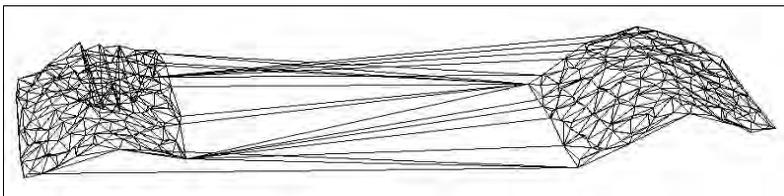


Abb. 1: TIN durch die als Kunstbauten klassifizierten Punkte

Wie in Abb. 1 zu sehen ist, sind unterschiedliche Gebäude durch lange Dreiecke miteinander verbunden, während die einzelnen Dachflächen aus vielen kleinen Dreiecken bestehen. Die Trennung der benachbarten Gebäudeobjekte wird deshalb durch einen Region Growing Ansatz erreicht, bei dem kurze benachbarte Dreiecke zu Segmenten (Dachflächen) gruppiert werden. Für die Bestimmung der Länge eines Dreiecks ist die längste räumliche Distanz zwischen zwei Punkten des Dreiecks maßgebend. Überschreitet die Distanz das 2,5-fache des mittleren Punktabstandes (3 Meter), wird das Dreieck als lang angesehen.

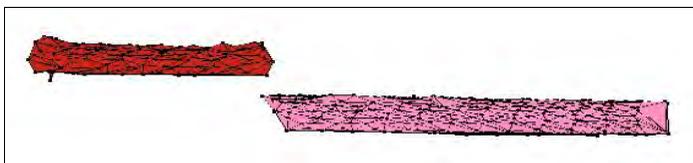


Abb. 2: Erfolgreich getrennte Flachdächer mit Höhenversatz (Seitenansicht leicht gekippt)

Der Vorteil dieser Methode ist, dass auch aneinander gebaute Gebäude getrennt werden können, deren Dächer einen Höhenversatz aufweisen, der mindestens dem Schwellwert für lange Dreiecke entspricht (Abb. 2). Solche Gebäude gehören zu einem Gebäudekomplex. Für die Weiterverarbeitung der extrahierten Gebäudepunktswolken ist es nützlich zu wissen, welche Gebäude benachbart sind, um z.B. Gebäudekomplexe später rekonstruieren zu können. Aus diesem Grund wird zusätzlich bei langen Dreiecken geprüft, wie groß die horizontale Distanz des höchsten und niedrigsten Dreieckspunktes ist. Unterschreitet diese Distanz einen festgelegten Schwellwert, d.h. die Gebäude grenzen aneinander, gelten die Segmente, in denen die beiden Dreieckspunkte liegen, als benachbart.

3.1.2 Nachbearbeitung der Segmente

Fehler in der Klassifizierung machen eine Nachbearbeitung der erhaltenen Segmente erforderlich. Zum einen enthält die Klasse *Kunstbauten* nicht nur Gebäude, sondern z.B. auch Mauern, Verkehrsmittel oder Vegetation. Solche Objekte bewirken, dass viele kleine Segmente separiert werden, die keine Gebäude repräsentieren. Der erste Nachbearbeitungsschritt soll verhindern, dass diese Objekte als Gebäude extrahiert werden (Fehler 2. Art). Hierzu wird die Segmentgröße untersucht. Ist das Segment kleiner als eine festgelegte Mindestgröße für Gebäude, wird es verworfen und nicht weiter betrachtet. Die Bestimmung der Segmentgröße erfolgt über ein TIN, das in die Segmentpunkte gerechnet wird. Aus der Summe der horizontalen Dreiecksflächen ergibt sich die Grundfläche bzw. die Größe des Segmentes.

Der zweite Nachbearbeitungsschritt geht auf einen weiteren Mangel der Klassifizierung ein. Da die bei der Punktklassifizierung verwendeten Grundrisse keine Dachüberstände enthalten, wurden diese als Vegetation klassifiziert. Eine Erweiterung hat nun das Ziel, die verbleibenden Gebäudesegmente um vorhandene Dachüberstände zu vergrößern und somit die vollständige Dachstruktur zu erfassen. Dazu werden zunächst alle Vegetationspunkte gesucht, die sich in einem definierten Puffer um das Segment befinden. Diese werden dann zusammen mit den Segmentpunkten zu einem TIN vermascht, auf das noch einmal der Region Growing Algorithmus (Abschnitt 3.1.1) angewendet wird. Das Ergebnis ist das erweiterte Segment (Abb. 3).



Abb. 3: Überlagerung von ursprünglichen und erweiterten Segmenten von Abb. 1

3.2 Subsegmentierung mit Grundrissen

Trotz der Segmentierung über lange Dreiecke kann bei Gebäudekomplexen in den meisten Fällen keine vollständige Trennung der einzelnen Gebäudeprimitive erreicht werden. Ziel ist es jedoch aneinander grenzende Bebauung weitestgehend zu teilen, da sich die einzelnen Gebäude in der Regel besser modellieren lassen als der zusammenhängende Gebäudekomplex und somit bessere Voraussetzungen für die Gebäudemodellierung geschaffen werden. Eine Verringerung des Parameters für die zulässige Länge der Dreiecke könnte zwar in manchen Fällen eine Lösung sein, führt jedoch zu einer stärkeren Zersplitterung der Segmente (Übersegmentierung). Eine andere Möglichkeit ist die Nutzung von Grundrissen für eine Subsegmentierung, wie es in Abschnitt 3.2.2 beschrieben wird.

Das Einbeziehen der Grundrissinformation hat noch einen weiteren Vorteil: Da eine Zuordnung der Grundrisse zu den Gebäudepunktewolken erfolgt (Abschnitt 3.2.1), können bei der Modellierung zusätzliche Informationen aus den Grundrissen gezogen werden (z.B. zur Haupttrichtung eines Gebäudes).

3.2.1 Zuordnung der Grundrisse zu den Segmenten

Voraussetzung für die Subsegmentierung der Gebäudepunktewolken ist die Information, welche Grundrisse zu welcher Gebäudepunktewolke gehören. Für diese Zuordnung wird um die Segmentpunktewolke eine Boundingbox gelegt, die sich aus den minimalen und maximalen X- und Y-Koordinaten der Punktewolke ergibt. Alle Grundrisse, deren Schwerpunkte in dieser Boundingbox liegen, werden dieser Gebäudepunktewolke zugeordnet (Abb. 4).

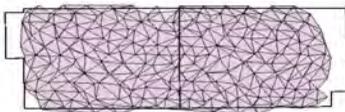


Abb. 4: Gebäudesegment mit gefundenen Grundrissen

3.2.2 Verfeinerte Segmentierung mit Grundrissen

Die Teilung eines Gebäudesegmentes mit Hilfe der gefundenen Grundrisse läuft in folgenden Schritten ab:

- Verschneidung der Segmentpunkte mit den Grundrissen
- Ausschluss von zu kleinen Subsegmenten
- Suche nach Gebäudeprimitiven im Segment, für die keine Grundrisse existieren
- Verbleibende Segmentpunkte den dichtesten Grundrissen zuweisen

Nachfolgend werden die einzelnen Schritte genauer erläutert.

Verschneidung von Segmentpunkten und Grundrissen

Die Verschneidung hat das Ziel, die Segmentpunkte zu finden, die sich innerhalb der Grundrisse befinden. Die Überprüfung, ob ein Punkt innerhalb oder außerhalb eines Grundrisspolygons liegt, erfolgt durch Ermittlung der *Kreuzungszahl*. Die Kreuzungszahl gibt an, wie viele Polygonkanten ein von einem Punkt in eine beliebige Richtung ausgehender Strahl kreuzt. Für eine effiziente Berechnung wird ein waagerechter Strahl nach rechts betrachtet. Ist die Kreuzungszahl null oder gerade, liegt der Punkt außerhalb des Grundrisses. Kreuzt der Strahl eine ungerade Anzahl von Polygonkanten, befindet sich der Punkt innerhalb es Polygons.

Auf diese Weise wird für jeden Punkt ermittelt, ob er in einem Grundriss liegt und in welchem. Die für jeden Grundriss erhaltenen Punktwolken stellen dann neue separate Segmente (Subsegmente) dar.

Ausschluss von kleinen Subsegmenten

Da im Datensatz der amtlichen Vermessung sehr viele kleine Polygone enthalten sind, die eine Übersegmentierung zur Folge hätten, werden die Subsegmente auf ihre Größe hin untersucht. Nach der Triangulation der einzelnen Punktwolken erfolgt die Berechnung der Grundfläche der Subsegmente aus den horizontalen Dreiecksflächen (s. Abschnitt 3.1.2). Ist ein Subsegment kleiner als eine vorgegebene Mindestgröße für Gebäude, wird der zugehörige Grundriss verworfen und die entsprechenden Segmentpunkte weiteren Verarbeitungsschritten unterzogen.

Zuweisung der verbleibenden Segmentpunkte

Nach der Verschneidung sind noch nicht alle Segmentpunkte Grundrissen zugeordnet. Übrig geblieben sind z.B. Dachüberstände, die Punktwolken der verworfenen Grundrisse und Gebäudeprimitive ohne Grundriss. Diese Punkte werden nun gesondert behandelt.

Die Grundidee besteht darin, die verbleibenden Segmentpunkte den dichtesten Grundrissen zuzuweisen. Deshalb ist der erste Schritt die Ermittlung der Punktabstände zu allen Grundrissen. Der Abstand eines Punktes zu einem Grundrisspolygon wird durch den rechtwinkligen ebenen Abstand des Punktes zu einer Polygonkante definiert. Die Bestimmung der für die Abstandsberechnung relevanten Polygonkante erfolgt über den zum Segmentpunkt nächstgelegenen Polygonpunkt. Dieser Polygonpunkt ist Bestandteil zweier Polygonkanten, der Kante zum vorhergehenden und der zum nachfolgenden Polygonpunkt (Polygonrichtung im Uhrzeigersinn).

Die Entscheidung, zu welcher der beiden Polygonkanten der Abstand berechnet wird, hängt von der Lage des betrachteten Segmentpunktes zum dichtesten Polygonpunkt ab (Abb. 5).

Liegt der Segmentpunkt links vom Polygonpunkt, wird die Polygonkante zum vorhergehenden Polygonpunkt für die Abstandsberechnung verwendet, andernfalls die zum Nachfolger. Die Lage der Punkte wird durch ihre Richtungswinkel zum Schwerpunkt des Grundrisses ausgedrückt. Im ersten Fall (Segmentpunkt liegt links) ist der Richtungswinkel am Segmentpunkt kleiner als am Polygonpunkt, im zweiten Fall ist es umgekehrt.

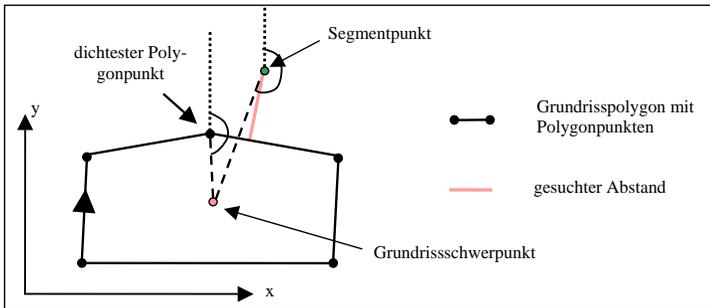


Abb. 5: Ermittlung der für die Abstandsberechnung relevanten Polygonkante

Nun kann der rechtwinklige Abstand des Punktes zur ermittelten Polygonkante berechnet werden. Bevor jedoch die Zuordnung aller Punkte zum dichtesten Grundriss erfolgt, wird geprüft, ob das Gebäudesegment vollständig durch Grundrisse repräsentiert wird bzw. ob Gebäude existieren, für die aufgrund mangelnder Aktualität und Vollständigkeit der AV-Daten kein Grundriss existiert (Abb. 6 links). Um eine vollständige Subsegmentierung zu erreichen, sollen diese Gebäude trotzdem erkannt und als separate Segmente ausgegeben werden.

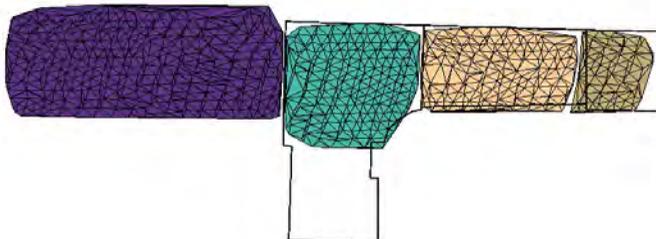


Abb. 6: Erfolgreich zerlegter Gebäudekomplex mit zugehörigen Grundrissen

Liegt dieser Fall vor, so gibt es eine unbestimmte Menge von Punkten, die bezüglich eines ausgewählten Grundrisses in der gleichen Richtung liegen. Diese Punkte unterscheiden sich von einem Dachüberstand durch einen größeren Abstand von dem Grundriss. Daraus ergibt sich der Ansatz für das Erkennen solcher Gebäude: Werden bezüglich eines Referenzpolygons in einer Richtung ausreichend viele Punkte mit einem großen Abstand von diesem Polygon gefunden, werden *alle* Punkte in dieser Richtung zu einem neuen Segment zusammengefasst.

Werden keine neuen Segmente mehr gefunden, werden die restlichen Punkte dem dichtesten Grundriss zugewiesen. Abb. 6 zeigt einen erfolgreich subsegmentierten Gebäudekomplex.

4 Ergebnisse

Um quantitative Aussagen zu den Ergebnissen der Segmentierung treffen zu können, wurde der Algorithmus an einem urbanen Bereich mit 347 Gebäuden (Einzelhäuser und Gebäudekomplexe) und an einem ländlichen Bereich mit 317 Gebäuden (überwiegend Einzelhäuser, geneigtes Gelände) getestet und visuell validiert. Für die Auswertung gibt es zwei Arten der Ergebnisausgabe: Einerseits besteht die Möglichkeit, die Schwerpunkte der extrahierten Gebäudepunktwolken in ArcGIS einzuladen und mit anderen Daten zu überlagern (z.B. mit Grundrissen, Orthophotos oder/und Laserscannerdaten), um einen Überblick zu den erzielten Ergebnissen zu bekommen. Eine genaue Ergebnisanalyse ist aber nur durch Betrachtung der 3D-Punktwolken der Gebäudesegmente in einem VRML-Viewer möglich.

Extrahierte Gebäudepunktwolken wurden als korrekt bewertet, wenn sie ausschließlich die Dachpunkte des Gebäudes enthalten und keine Nachbearbeitung erforderlich ist (Abb. 7 links). Die Segmentierung war nicht fehlerfrei, wenn sich in der Punktwolke auch Punkte befanden, die auf anderen Objekten reflektiert wurden (z.B. Vegetation, Dachpunkte benachbarter Gebäude). Die übrigen Gebäude waren überhaupt nicht detektierbar. Die nachfolgende Tabelle fasst die Ergebnisse der Segmentierung zusammen.

Tab. 1: Erfolgsrate der Gebäudedetektion

	Urbanes Testgebiet	Ländliches Testgebiet
Korrekt segmentiert	65 %	55 %
Nicht fehlerfrei segmentiert	30 %	38 %
Nicht detektiert	5 %	7 %

Man sieht, dass über 90% der Gebäude detektiert werden konnten. Ein Vergleich des städtischen und ländlichen Bereiches zeigt, dass die Gebäudedetektion in Stadtgebieten geringfügig besser ist. Unterschiede bestehen in der Anzahl der fehlerbehafteten Gebäudesegmente und der Anzahl nicht detektierter Gebäude. Die häufigste Ursache für Störpunkte in den extrahierten Punktwolken ist niedrige Vegetation, die sich vor allem im ländlichen Bereich häufig dicht am Gebäude befindet oder sogar über das Dach ragt (Abb. 7 rechts).

Im städtischen Bereich war die Hauptursache für fehlerbehaftete Segmente eine unzureichende Subsegmentierung. Ein Problem ist hierbei das nicht perfekte Übereinstimmen der Grundrisse mit den Laserscannerdaten, was überwiegend auf Lagefehler der Laserscannerdaten zurückzuführen ist. Somit kann es passieren, dass Punkte des benachbarten Gebäudes mit in die Punktwolke gelangen. Der Grund für nicht detektierte Gebäude ist eine falsche Klassifizierung der Gebäudepunkte. Prinzipiell können mit dieser Methode nur Gebäude detektiert werden, die als Kunstbauten klassifiziert sind. Das Verfahren ist demzufolge von der Güte der Klassifizierung abhängig, die in Stadtgebieten aufgrund des Fortführungsstandes und der Vollständigkeit der eingehenden AV-Daten besser ist als in Außenbereichen.

5 Zusammenfassung

Es wurde eine automatische Methode zur Detektion und Segmentierung von Gebäuden vorgestellt, die auf klassifizierten Laserscannerdaten basiert und zusätzlich Grundrisse nutzt. Das Verfahren ist in der Lage, Datenmengen von mindestens ca. 20 Mio. Punkten zu prozessieren und erzielt eine hohe Detektionsrate. Es ermöglicht eine feinere Segmentierung als dies ohne Zusatzinformationen möglich wäre.



Abb. 7: Korrekt detektierte Gebäude (links) und ein mit Vegetation detektiertes Gebäude (rechts)

Die Problematik der Trennung von Gebäuden und dichter Vegetation konnte trotz der Klassifizierung der Laserscannerdaten nicht gelöst werden. Grund ist das notwendige Einbeziehen der Vegetationspunkte zur Erfassung von Dachüberständen. Dieser Umstand erfordert robuste Modellierungsverfahren, die trotz Störpunkten in der Lage sind, die Struktur des Daches zu erkennen. Ein solches Verfahren ist z.B. die Linienmethode (SCHWALBE, 2004), mit der ca. 50% der in Tab. 1 aufgezeigten imperfekten Gebäudepunktwolken trotzdem korrekt modelliert werden konnten. Ein möglicher Ansatz um Vegetationspunkte (Ausreißer) vor der Modellierung zu entfernen, wäre die Anwendung einer kantenerhaltenden Filterung auf die extrahierten Gebäudepunktwolken.

6 Literatur

- AMTLICHE VERMESSUNG (2005): <http://www.cadastre.ch/de/av/stat.html>, Stand 09.06.2006
- AXELSSON, P. (1999): Processing of laser scanner data - algorithms and applications. - *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 54 1999: pp. 138-147
- CHILTON, T. D., JAAFAR, J. & PRIESTNALL, G. (1999): The use of laser scanner data for the extraction of building roof detail using standard elevation derived parameters. - *Workshop on Mapping Surface Structure and Topography by Airborne and Spaceborne Lasers*, La Jolla, Ca, November 9-11, 1999
- HAALA, N. & BRENNER, C. (1997): Generation of 3D city models from airborne laser scanning data. - *IAPRS Volume XXXII, Part 3.4/W2*, Stuttgart, 1997
- HAALA, N., BRENNER, C. & STÄTTER, C. (1998): An intergrated system for urban model generation. - *Proceedings ISPRS Congress Comission II, WG 6*, Cambridge, UK, Juli 13-17, 1998: pp. 96-103
- HOFMANN, A. D., MAAS, H.-G. & STREILEIN, A. (2003): Derivation of roof types by cluster analysis in parameter spaces of airborne laser scanner point clouds. - *IAPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.34, Part 3/W13, pp. 112-117
- MAAS, H.-G. (2005): Akquisition von 3D-GIS Daten durch Flugzeuglaserscanning. - *Kartographische Nachrichten*, Vol.55, Heft 1: S. 3-11
- LUETHY, J., STENGELE, R. (2005): 3D mapping of Switzerland-challenges and experiences. - *ISPRS Workshop "Laser scanning 2005"*, Enschede, September 12-14, 2005
- SCHWALBE, E. (2004): 3D building model generation from airborne laserscanner data by straight line detection in specific orthogonal projections. - *IAPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.35, Part B: pp. 249-254
- SITHOLE, G. & VOSSelman, G. (2003): Automatic structure detection in a point cloud of an urban landscape. - *Proceedings of 2nd Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas*, Berlin, May 22-23, 2003: pp. 67-71
- VOSSelman, G. & DIJKMAN, S. (2001): 3D building model reconstruction from point clouds and ground plans. - *IAPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.34, Part 3/W4: pp. 37-43

Der Gebäudekragen – Eine detaillierte Betrachtung des Übergangs von Gebäude und Gelände

JÖRG SCHMITTWILKEN¹ & THOMAS H. KOLBE² & LUTZ PLÜMER³

Zusammenfassung: Die zunehmende Zahl von Anwendungen virtueller 3D-Stadtmodelle geht mit steigenden Anforderungen an die Qualität und Auflösung der Modelle einher. Die Erhöhung der geometrischen Auflösung ist durch die Fortschritte in der Sensortechnologie im Bereich des Laserscannings und der photogrammetrischen Bilderfassung bereits Realität. Es mangelt jedoch an ausreichend detaillierten semantischen Modellen, die dem geometrischen Detaillierungsgrad entsprechen. Denn erst die Semantik erschließt jene Anwendungsbereiche, die über eine bloße Visualisierung oder Sichtbarkeitsanalyse hinausgehen.

Dieser Beitrag stellt eine detaillierte semantische Modellierung des Übergangsbereiches vom Gelände zum Gebäude – den Gebäudekragen – vor. Er berichtet über aktuelle Forschungsarbeiten in einem DFG-geförderten, chinesisch-deutschen Kooperationsprojekt. Neben der Diskussion des entwickelten Modells des Gebäudekragens wird auch eine kurze Vorausschau zur Nutzung der Gebäudekragen-Ontologie für die Entwicklung automatisierter Extraktionsverfahren gegeben.

1 Einleitung

Virtuelle 3D-Stadtmodelle werden in vielen Bereichen zur Analyse, Bewertung und Darstellung urbaner Situationen eingesetzt und sind beispielsweise für die Hochwassersimulation oder die aktuell diskutierte Umsetzung der EU-Umgebungslärmrichtlinie 2002/49/EG von hoher Bedeutung. Die zunehmende Zahl von Anwendungen geht mit steigenden Anforderungen an Qualität und Auflösung der Modelle einher. So werden die Ansprüche der Anwender z.B. bei der Fußgängernavigation nicht durch ein einfaches Klötzchenmodell befriedigt. Hier sind 3D-Stadtmodelle mit höherem Detaillierungsgrad (level of detail, LOD) gefragt, die differenzierte Dachstrukturen, wichtige Gebäudebestandteile wie Balkone, Erker oder Eingangsbereiche und präzise Geländemodelle erfordern.

Aufgrund der aktuell verfügbaren Sensortechnologie im Bereich des Laserscannings und der photogrammetrischen Bilderfassung ist die Erhöhung der geometrischen Auflösung bereits Realität. Jedoch mangelt es an ausreichend detaillierten semantischen Modellen, die dem geometrischen Detaillierungsgrad entsprechen. Gehen die Bedürfnisse der Anwender über eine bloße Visualisierung hinaus, so wird ein 3D-Modell benötigt, das die Bedeutung der Objekte, ihre Beziehungen zueinander und thematische Attribute beinhaltet. Letztendlich erschließt erst die explizite thematische Modellierung viele Anwendungsbereiche wie die Indoor-Navigation oder das Facility-Management. Es werden daher Konzepte und Modelle benötigt, die eine geometrische und semantische Verfeinerung existierender 3D-Stadtmodelle ermöglichen.

¹ Dipl.-Ing. Jörg Schmittwilken, E-Mail: schmittwilken@ikg.uni-bonn.de

² Dr. Thomas H. Kolbe, E-Mail: kolbe@ikg.uni-bonn.de

³ Prof. Dr. Lutz Plümer, E-Mail: pluemer@ikg.uni-bonn.de

Der hier angesprochene Skalenwechsel von einfachen 3D-Modellen zu komplexen Architekturmodellen (vgl. Abbildung 1) wird derzeit in einem Projekt am Institut für Kartographie und Geoinformation (IKG) der Uni Bonn untersucht. Er entspricht dem Übergang von LOD2 nach LOD3 gemäß der von der Special Interest Group 3D (SIG 3D) der Initiative Geodateninfrastruktur NRW (GDI NRW) vorgeschlagenen fünf Detaillierungsgrade für 3D-Stadtmodelle (KOLBE & GRÖGER 2006; GRÖGER et al. 2005, KOLBE et al. 2005). Das Projekt ist eingebettet in das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und dem chinesischen Pendant geförderten Bündelprojekt „Interoperation of 3D Urban Geoinformation“. Darin beschäftigen sich seit Anfang 2006 elf chinesische Partner und acht Institute deutscher Hochschulen mit der Interoperabilität und semantischen Anreicherung urbaner 3D-Geoinformation. Der Übergang von Gebäude und Gelände ist der zentrale Untersuchungsgegenstand des Teilprojekts, bei dem das IKG und das Institut für Photogrammetrie der Universität Bonn kooperieren. Basierend auf einer Ontologie dieses Übergangs sollen die darin befindlichen Objekte wie Eingangstrepfen oder Arkaden semiautomatisch aus terrestrischen Stereobildern rekonstruiert werden. Im Folgenden wird der Fokus auf den Modellierungsaspekten liegen.

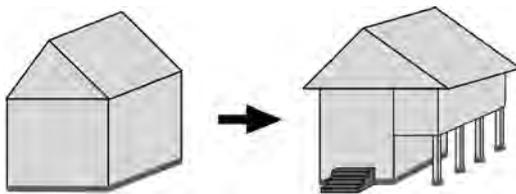


Abb. 1: Erhöhung der geometrischen und semantischen Auflösung beim Skalenwechsel zwischen LOD2 (links) und LOD3 (rechts). Alle geometrischen Primitive sind thematisch klassifiziert.

Die Fragestellung nach Art und Beschaffenheit des Übergangs von Gebäude und Gelände soll durch zwei Überlegungen motiviert werden:

1. Geodateninfrastrukturen (GDIs) ermöglichen es dem Anwender, Daten im Baukastensystem von mehreren Anbietern zusammenzustellen. Da die Daten nicht nur aus heterogenen Quellen stammen, sondern häufig auch auf unterschiedlichen Erfassungsmethoden basieren, passen die Daten oft geometrisch und semantisch nicht zueinander. Als typisches Beispiel seien Gebäude genannt, die mit dem digitalen Geländemodell (DGM) aus einer anderen Datenquelle gemeinsam visualisiert werden. Die Gebäude werden in vielen Fällen über der Geländeoberfläche schweben oder (zu tief) in diese einsinken.
2. Bei stetiger Verfeinerung der Auflösung von 3D-Stadtmodellen wird letztendlich auch die Innenraummodellierung von Interesse sein. Der Übergang von Außenbereichen zu Innenräumen erschließt völlig neue Anwendungsgebiete für 3D-Stadtmodelle. Dies setzt aber die geometrisch, topologisch und semantisch korrekte Repräsentation der realen Welt voraus. Soll ein so detailliertes Modell beispielsweise zur Navigation genutzt werden, können Innenräume nur dann von einer Straße aus erreicht werden, wenn die Topologie zwischen Innenräumen und Außenbereichen korrekt wiedergegeben wird und die beiden Bereiche nahtlos ineinander übergehen. Überlappungen oder Löcher machen eine automatische Navigation unmöglich.

2 Der Gebäudekragen

Eine skalenabhängige Betrachtung des Übergangs von Gebäude und Gelände erfordert eine detaillierte räumliche und semantische Modellierung. Im LOD2-Modell (Abbildung 1 links) wird dieser Übergang durch eine einfache *Bodenkante* (Schnittlinie zwischen Gelände und Gebäude – dunkel grau) beschrieben. Bei der Erhöhung der geometrischen Auflösung treten feine Fassadenstrukturen wie Fensterbänke und Simse ebenso in Erscheinung, wie Treppen, Erker, Balkone oder Eingangsbereiche. Im höheren Detaillierungsgrad weicht das Konzept der Bodenkante auf und ein scharfer, linienförmiger Übergang ist aufgrund von Objekten wie Treppen, Arkaden oder Lichtschächten nicht mehr auszumachen (Abbildung 1 rechts). Vielmehr tritt hier der *Gebäudekragen* (Abbildung 2) als ein unscharfer Bereich des Übergangs

von Gebäude und Gelände, von Innenräumen und Außenbereich an die Stelle der Bodenkante. Die Bezeichnung wurde als Metapher zum Hemdkragen gewählt, der den Übergang von der (horizontalen) Schulterpartie zum (vertikal herausragenden) Kopf gestaltet. Im Sinne einer Faustformel könnte man ihn wie folgt skizzieren: „Die Außenwände von Keller, Erdgeschoss und erstem Obergeschoss und alle Objekte im Umkreis von 15m um das Gebäude“.

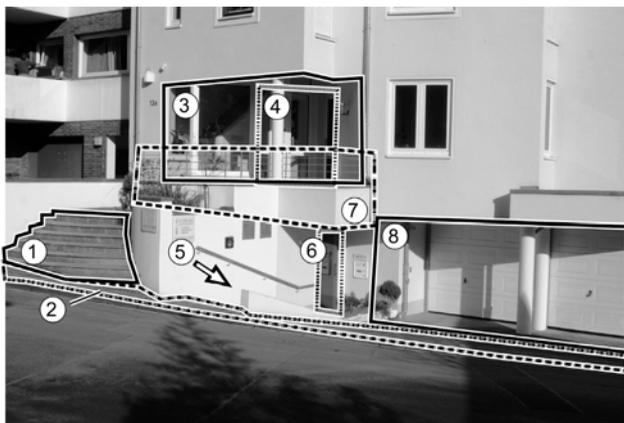


Abb. 2: Elemente des Gebäudekragens: 1) Treppe, 2) Gehweg, 3) aufgeständertes Gebäudeteil („Arkade“), 4) Eingangsbereich, 5) Treppe, 6) Eingangsbereich, 7) Balkon/Terrasse, 8) aufgeständertes Gebäudeteil („Arkade“).

2.1 Das semantische Modell des Gebäudekragens

Für die angestrebte semi-automatische Extraktion der Objekte aus Bildern müssen die zu rekonstruierenden Elemente explizit im Sinne einer Ontologie des Gebäudekragens modelliert werden. CityGML stellt dafür eine geeignete Basis dar. Die in CityGML definierte Semantik der Objekte *BuildingPart* (z.B. Wintergarten), *BuildingInstallation* (z.B. Treppe) oder *GenericCityObject* genügen den Ansprüchen des Datenaustauschs; die Objekte des Gebäudekragens müssen für die Entwicklung automatisierter Extraktionsverfahren aber spezifischer modelliert und repräsentiert werden. Im Folgenden wird ein Modell des Gebäudekragens vorgestellt, das den räumlichen und semantischen Anforderungen bis hin zu LOD3 genügt.

Abb. 3 zeigt ein vereinfachtes statisches UML-Klassendiagramm (*Unified Modeling Language*, BOOCH et al., 1997) des Gebäudekragens (*BuildingCollar*), das lediglich die Hauptklassen der enthaltenen Objekte darstellt⁴. Als Oberklassen und somit Hauptbestandteile des Gebäudekragens wurden die Objekte Verkehrsfläche, Arkade, Wand, Eingang, Lichtschacht, Straßenmöbel, Terrasse, Böschung, Begrenzung, Gewässer und Vegetationsobjekt identifiziert. Nicht dargestellt sind in dem Diagramm die Beziehungen zwischen den Objekten wie beispielsweise die Aggregationsbeziehung zwischen Arkaden und Wänden (Eine Arkade besteht u.a. aus Wänden). Jede dieser Oberklassen hat Aggregations-, Spezialisierungs- und/oder Assoziationsbeziehungen zu weiteren Klassen, so dass das Modell insgesamt 47 Objektklassen umfasst. Darüber hinaus sind 15 teils abstrakte Klassen aus CityGML übernommen (z.B. *CityFurniture*).

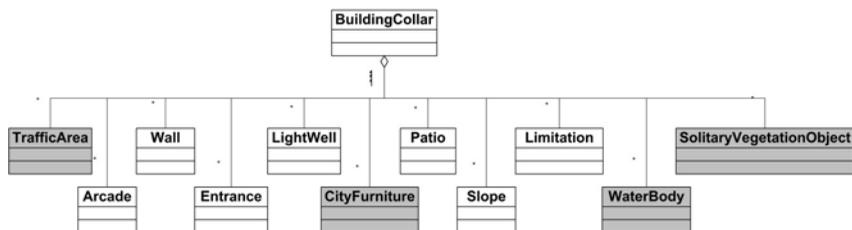


Abb. 3: Hauptobjekte des Gebäudekragens in einem UML-Klassendiagramm. CityGML-Basisklassen sind grau hinterlegt. Die anderen Klassen stellen Erweiterungen dar.

Die Darstellung des gesamten Diagramms würde den Umfang dieses Artikels überschreiten, so dass im Folgenden das Detailmodell für Eingangstrepfen beispielhaft vorgestellt wird, das wie in Abbildung 4 dargestellt in das Gesamtmodell integriert ist.

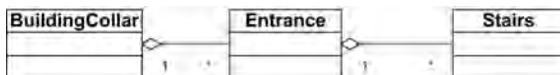


Abb. 4: UML-Klassendiagramm zur semantischen Einordnung von Eingangstrepfen in den Kontext des Gebäudekragens. Detailbetrachtung von Eingangstrepfen

2.2 Detailbetrachtung von Eingangstrepfen

Im Rahmen des oben erwähnten Projekts werden Eingangstrepfen als besondere Beispielobjekte betrachtet. Dies liegt zum einen an ihrer einfachen und regelmäßigen Struktur und der daraus resultierenden überschaubaren Zahl der Parameter. Symmetrie, Parallelitäten und Kollinearitäten sind wichtige Eigenschaften von Treppen und ihren Elementen. Zum anderen ist gerade ihre verbindende Funktion zwischen Innenräumen und Außenbereich sowie die Verbindung mit dem Wegenetz von besonderem Interesse.

⁴ Zur UML-Notation: Die Linienverbindung mit der Raute repräsentiert eine Aggregationsbeziehung zwischen zwei Objekten, Zahlen und/oder * geben die Multiplizitäten an. Das Diagramm ist folgendermaßen zu lesen: „Ein Gebäudekragen besteht aus keiner oder beliebig vielen Arkaden – Eine Arkade gehört zu genau einem Gebäudekragen.“

Die Bedeutung einer Treppe liegt unter anderem in der fußläufigen Überwindung eines Höhenunterschieds. Das alleine unterscheidet sie aber noch nicht von einer Leiter. Entscheidend für eine Treppe ist die Begehbarkeit und die iterative Anordnung von versetzten Stufen. Die geometrischen Eigenschaften von Treppen wurden erstmals von BLONDEL (1683) nach Kriterien der Bequemlichkeit beschrieben. Auch die Deutsche Industrie Norm DIN 18065 (Gebäudetreppen) macht wichtige Aussagen zur Geometrie, Mindest- und Höchstmaßen von Treppen. Gemäß dieser Norm setzt sich eine Treppe aus Stufen zusammen, die wiederum aus *Steigungen* (vertikale Elemente) und *Auftritten* (horizontale Elemente) bestehen.

In Abbildung 5 ist das UML-Klassendiagramm einer Treppe dargestellt. Das gezeigte Modell erlaubt es sowohl mehrere Treppen (*Stairs*) zu einer Gesamttreppe (*AggregatedStairs*) zusammenzufassen, als auch das Hinzufügen von Podesten (*Platform*) zwischen unterschiedlichen Treppen. Es können beliebig viele Treppen in ein Podest münden. Dabei werden die höher liegenden und die tiefer liegenden Treppen durch die Assoziationen *lowerStairs* und *upperStairs* dem Podest zugeordnet. Die Klassen für vertikale und horizontale Elemente (*Riser*, *Tread*) referenzieren durch die Attribute *upperXPart/lowerXPart* (*X* = *Riser* oder *Tread*) die beidseitig anschließenden Elemente. Durch entsprechende Assoziationen werden GML-Geometrieobjekte vom abstrakten Typ *_Curve* (Polygon, Spline o.ä.) referenziert, welche die Treppenkanten (*upperCurve/lowerCurve* bzw. *leadingCurve/trailingCurve*) explizit beschreiben. Das GML-Geometrie- und Topologiemodell basiert dabei auf der ISO-Norm 19107 „Spatial Schema“ (siehe COX ET AL. 2004, HERRING 2001). Gerade für die bildbasierte Objekterkennung sind diese Kanten aufgrund ihrer guten Detektierbarkeit in Bildern von großer Bedeutung. Die Kanten der Treppenelemente sind vom Typ *_Curve*, um das Modell nicht auf Treppen mit geraden Stufen zu beschränken. Auf diese Weise lassen sich z.B. auch Kegeltreppen abbilden. Darüber hinaus werden allen Elementen über die Assoziation *lod3Surface* flächenhafte GML-Geometrien (*_Surface*) zugeordnet. Zusätzlich referenziert die Klasse *Stairs* auch die volumenhafte GML-Geometrie *Solid*.

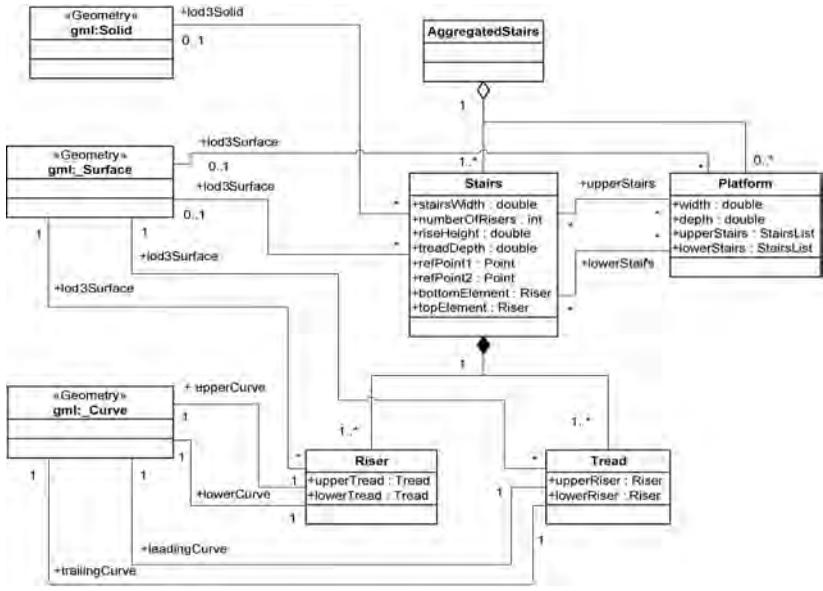


Abb. 5: Statisches UML-Klassendiagramm der Detailmodellierung von Eingangstrepfen

Die Form, Lage und Orientierung der Treppe wird bestimmt durch die Parameter *stairsWidth* (Breite der Treppe), *numberOfRisers* (Anzahl der Steigungen), *riseHeight* (Höhe der Steigungen), *treadDepth* (Tiefe der Auftritte), *refPoint1* (erster 2D-Referenzpunkt), *refPoint2* (zweiter 2D-Referenzpunkt). Zusätzlich werden Verweise auf die abschließenden Elemente einer Treppe als Attribut geführt: *bottomElement* und *topElement* müssen beide vom Typ eines vertikalen Elements (*_vertikalPart*) sein.

Die Informationen der Treppenparameter sind redundant zu der explizit gegebenen Randflächendarstellung (*Boundary Representation*, B-Rep) und bedingen sich gegenseitig. So lässt sich beispielsweise aus den beiden 2D-Referenzpunkten die Breite und unter Berücksichtigung der Auftrittstiefe die Anzahl der Steigungen ableiten. Diese scheinbare Unzulänglichkeit des Modells wird im nächsten Kapitel aufgegriffen und ausgeführt.

Das vorgestellte Modell einer Gebäudetreppe macht über die Form von Treppen bislang nur wenige Aussagen. In dem Diagramm fehlen beispielsweise Informationen, die den sich immer wiederholenden Wechsel von Steigung und Auftritt erzwingen. Das statische UML-Modell sieht auch eine Treppe, die lediglich aus Auftritten besteht, als Treppe an. Zwar haben die Klassen *Rise* und *Tread* Assoziationen, die auf die benachbarten Objekte des jeweils anderen Typs verweisen sollen, dies stellt aber noch nicht sicher, dass die beiden Objekte eine gemeinsame Kante haben und somit wirklich benachbart sind. Es ist notwendig, Bedingungen zu formulieren, welche das Modell soweit einschränken, dass nur „echte“ Treppen abgebildet werden können, die diese Nachbarschaften berücksichtigen.

Für Steigungen können diese Bedingungen wie folgt skizziert werden (für die Auftritte entsprechend):

- Die durch *upperCurve* referenzierte Kante muss identisch sein, mit der durch *leadingCurve* referenzierten Kante des *upperTread*.
- Die durch *lowerCurve* referenzierte Kante muss identisch sein mit der durch *trailingCurve* referenzierten Kante des *lowerTread*.
- Die *upperCurve* und die *lowerCurve*
 - müssen jeweils in einer horizontalen Ebene liegen,
 - müssen den gleichen Grundriss in der 2D-Projektion (XY-Ebene) haben und
 - müssen den gleichen Abstand zueinander haben, den der Parameter *riseHeight* der Treppe vorgibt, zu dem diese Elemente gehören.
- Die *upperCurve* muss höher liegen als die *lowerCurve*.

Ein möglicher Formalismus zur konsistenten Beschreibung dieser Bedingungen ist die *Object Constraint Language* (OCL, OMG 2003). OCL ist eine formale Sprache, die konzipiert wurde, um Bedingungen (Invarianten) auf der Ebene von Objektinstanzen in deklarativer Weise ausdrücken zu können. In der OCL-Notation würde die erste der zuvor skizzierten Bedingungen so lauten:

```
context r: Riser inv:
  r.upperCurve = r.upperTread.leadingCurve
```

3 Generative Modelle

Die Differenzierung des Gebäudekragens hat das Ziel der halbautomatischen Rekonstruktion der darin enthaltenen Elemente aus terrestrischen Stereobildern, welche vorhandene LOD2-Modelle geometrisch und semantisch durch die neu extrahierten 3D-Objekte veredeln sollen. Die folgenden Überlegungen werden erneut beispielhaft anhand der Treppen diskutiert.

Das UML-Modell für Treppen ist Ausgangspunkt für die Ableitung eines 3D-Geodatenbankschemas, in der künftig die rekonstruierten Elemente (zwischen)gespeichert werden. In Verbindung mit den in OCL formulierten Bedingungen ermöglicht es zudem die Validierung instanzierter Objekte und die Definition entsprechender Integritätsregeln auf der 3D-GeODB. Bei der Rekonstruktion stellt sich allerdings die Frage nach der Generierung solcher Objektinstanzen. Da mit unvollständigen und fehlerbehafteten Beobachtungen in den Bildern gerechnet werden muss, müssen Hypothesen für Treppen erzeugt werden, die von ihrer Form her Treppen darstellen und welche die (nur teilweise) beobachteten Merkmale erklären können. Um die erlaubten Objektkombinationen sowie die iterativen Modellelemente wie z.B. Treppenstufen systematisch anzuordnen, wird eine zusätzliche generative Modellierungskomponente benötigt. Dazu soll in dem Projekt künftig die Verwendung von Gestaltgrammatiken (STINY & GIBS 1972) zur Beschreibung generativer Modelle untersucht werden.

STEINHAGE (1999) hat Gestaltgrammatiken bereits zur automatischen Gebäuderekonstruktion aus Luftbildern eingesetzt. Sie basieren auf einer Menge geometrischer Elemente (Symbole, Alphabet) und Ersetzungsregeln. Ausgehend von einem festgelegten Startsymbol werden durch sukzessives Anwenden der Ersetzungsregeln auf Teile bestehender Kombinationen geometrischer Grundelemente letztendlich Objekte (Worte) generiert. Für Treppen könnte eine solche Grammatik wie in Abbildung 6 dargestellt aussehen. Gezeigt sind die Ersetzungsregeln: Gestrichelte Elemente (Nichtterminalsymbole) können durch nicht gestrichelte Elemente (Terminalsymbole) ersetzt werden. Das Alphabet der Treppengrammatik besteht aus Steigungen (senkrecht), Auftritten (waagrecht, kurz) und Podesten (waagrecht, lang).

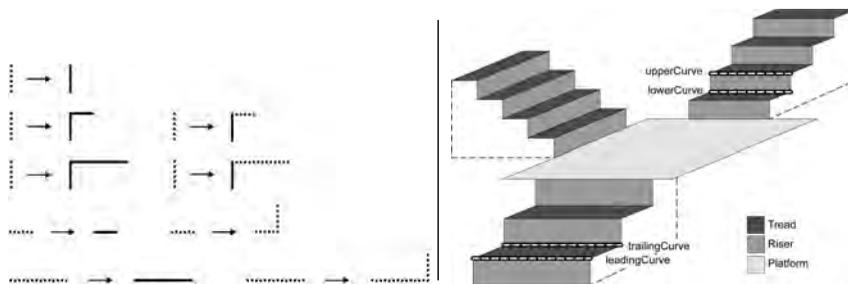


Abb. 6 (links): Ersetzungsregeln einer Gestaltgrammatik für Treppen (Seitenansicht auf Stufenkombinationen): Nichtterminalsymbole sind gestrichelt dargestellt, Terminalsymbole durchgezogen. (rechts): Beispiel für eine mit der Grammatik und dem Modell aus Abb. 5 realisierbare Treppe.

Werden die Objekte dieser Grammatik ins Dreidimensionale übertragen, indem die dargestellten Linien in Flächen überführt werden, so können auch Treppenmodelle generiert werden, bei denen mehrere Treppenläufe von einem Podest abgehen (siehe Abb. 6 rechts).

Wie in Abschnitt 2.1.1 angedeutet, ist die vorgestellte Treppenmodellierung insofern redundant, dass einerseits die Treppengeometrie explizit durch ihre Randflächen (und damit auch der entsprechenden Kanten) angegeben, sie andererseits aber auch parametrisch in Form der Stufenanzahl, Steigungen und Auftrittstiefen spezifiziert werden kann. Ziel ist es, aus der Beobachtung einzelner Treppenflächen und -kanten auf eine konsistente parametrische Dar-

stellung zu schließen. Probleme entstehen dabei insbesondere dadurch, dass Unregelmäßigkeiten der zu rekonstruierenden Treppe, aber auch fehlerhafte und unvollständige Beobachtungen zu einer Verletzung der durch die Gestaltgrammatik vorgesehenen regelmäßigen Struktur führen. Bzgl. der Verwaltung dieses Widerspruchs haben BRENNER (2005, 2004) und KOLBE (1999) in ihren Arbeiten bereits Modelle vorgestellt, die die Relaxation von Bedingungen auf geometrischen Primitiven erlauben. Eine Übertragung dieser Konzepte auf Modelle, die durch Gestaltgrammatiken beschrieben werden, ist jedoch noch nicht erfolgt. Dies soll im weiteren Verlauf des Projekts adressiert werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde gezeigt, dass in virtuellen 3D-Stadtmodellen der Übergang vom Gelände zum Gebäude ab einem bestimmten Detaillierungsgrad (LOD3) nicht mehr durch eine scharf abgrenzende Bodenkante beschrieben werden kann, sondern vielmehr als eine unscharfe Region – der Gebäudekragen – aufzufassen ist. Zur Beschreibung des Gebäudekragens wurde ein detailliertes semantisches Modell der enthaltenen Objekte und Relationen entwickelt, wobei der Beitrag sich auf die beispielhafte Darstellung der Treppenmodellierung fokussiert, anhand derer sowohl die semantische Differenzierung als auch die Formgenerik deutlich wird.

Das vorgestellte statische UML-Klassendiagramm dient zum einen dem Aufbau einer 3D-Geodatenbank, die zur Speicherung von Rekonstruktionsergebnissen aber insbesondere auch als Schnittstelle zwischen verschiedenen Teilprozessen des Interpretationssystems verwendet wird. Zum anderen ist es Ausgangspunkt für die Definition einer Gestaltgrammatik, die die möglichen Primitivkombinationen und gültigen Formen parametrisch beschreibt und damit eine explizite Verbindung der generativen, parametrischen Geometriemodellierung mit der expliziten, akkumulativen Beschreibung der Objekte (durch ihre Flächen und Kanten) schafft.

Künftig wird es darum gehen, datengetrieben eine beschränkte Instanziierung im Rekonstruktionsprozess zu ermöglichen, da Gestaltgrammatiken aufgrund ihrer rekursiven Struktur prinzipiell beliebig große und beliebig komplexe Hypothesen erzeugen können. Besonderer Augenmerk wird dabei auf der Behandlung von Abweichungen von Beobachtungen in Bezug auf Grammatikregeln sowie der Handhabung und Propagierung von Unsicherheiten und Fehlern über die Produktionsregeln der Grammatik hinweg liegen.

5 Literaturverzeichnis

- BOOCH, G., RUMBAUGH, J. & JACOBSON, I. 1997: Unified Modeling Language User Guide. Addison-Wesley.
- BRENNER, C. 2004: Modelling 3d Objects Using Weak CSG Primitives. In: Proc. of the XXth ISPRS Congress, 12-23 July 2004 Istanbul, Turkey, Band XXXV der Reihe IAPRS
- BRENNER, C. 2005: Constraints for Modelling Complex Objects. In: Stilla, Rottensteiner und Hinz (Hrsg.): Proceedings of the ISPRS Workshop CMRT 2005, Vienna - Austria, 29-30 Aug 2005, Band XXXVI der Reihe IAPRS, Seiten 49–54.
- COX, S., DAISY, P., LAKE, R., PORTELE, C. & WHITESIDE, A. 2004: OpenGIS Geography Markup Language (GML 3.1), Implementation Specification Version 3.1.0, Recommendation Paper, OGC Doc. No. 03-105r1
- GRÖGER, G., BENNER, J., DÖRSCHLAG, J., DREES, R., GRUBER, U., LEINEMANN, K. & LÖWNER, M.-O., 2005: Das Interoperable 3D-Stadtmodell der SIG 3D. Zeitschrift für Vermessungswesen, 130, S. 343–353.

- HERRING, J. 2001: The OpenGIS Abstract Specification, Topic 1: Feature Geometry (ISO 19107 Spatial Schema), Version 5. OGC Document Number 01-101
- KOLBE, T. H. & GRÖGER, G., 2006: CityGML - OGC konforme Standards für 3D-Stadtmodelle. In: Tagungsbld. des Symposiums Praktische Kartographie, Königslutter.
- KOLBE, T. H., GRÖGER, G. & PLÜMER, L., 2005: CityGML - Interoperable Access to 3D City Models. In: Proceedings of the 1st International Symposium on Geo-information for Disaster Management, Delft, The Netherlands, Springer Verlag.
- KOLBE, T.H. 1999: Identifikation und Rekonstruktion von Gebäuden in Luftbildern mittels unscharfer Constraints. Dissertation, Hochschule Vechta.
- OMG 2003: UML 2.0 OCL Specification.
- STEINHAGE, V., 1999: Zur automatischen Gebäuderekonstruktion aus Luftbildern. Habilitationsschrift an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät, Universität Bonn.
- STINY, G. & GIBS, J., 1972: Shape Grammars and the Generative Specification of Painting and Sculpture. In: Freiman und Griffith (Hrsg.): Proceedings of IFIP Congress 71, Volume 2 - Applications, Ljubljana, Yugoslavia, August 23-28, 1971., Seiten 1460–1465.

Photogrammetriestandards bei ISO, OGC, ISPRS und EuroSDR

WOLFGANG KRESSE¹

Abstract: This paper reports the activities in standardization of the ISO/TC 211 "Geographic information / Geoinformatics", the Open Geospatial Consortium (OGC), the ISPRS, and EuroSDR.

The ISO 19101-2 „Reference model – Part 2: Imagery“ and the 19115-2 „Metadata – Part 2: Imagery and gridded data“ have reached the committee draft stage. The ISO 19130 „Sensor data models for imagery and gridded data“ was deleted because of the expiration of the 5-year development period. However, the ISO 19130 will be restarted soon and partly redesigned according to the new ISO 19101-2 and ISO 19115-2.

The OGC made progress with its Sensor Web Enablement (SWE). SensorML and TML became part of a Best Practices Paper. The ISPRS and EuroSDR successfully brought together the experts on modern sensors such as digital aerial cameras, ALS, and IMU, giving impetus to the related standardization.

1 ISO/TC 211

Seit der letzten Jahrestagung der DGPF fanden zwei Plenarsitzungen des ISO/TC 211 statt, und zwar im September 2005 in Montreal, Kanada, und im Mai 2006 in Orlando, USA. Eines der Schwerpunktthemen sind in diesen Jahren die Normen für Photogrammetrie und Fernerkundung unter dem Titel „Imagery and gridded data“.

1.1 ISO 19101-2

Das Committee Draft (CD) der ISO 19101-2 „Reference model – Part 2: Imagery“ wurde im Januar 2006 fertig gestellt und stand bis zum April zur Diskussion. Die knapp 500 Kommentare verursachen einige größere Änderungen und haben auch Auswirkungen auf benachbarte Normen. Die ISO 19101-2 wurde von vielen Kommentatoren nicht als ausreichend abstraktes Referenzmodell angesehen. Einige Kapitel wie jenes über flugzeuggestütztes Laserscanning (ALS, Airborne Laser Scanning) sind recht spezialisiert und sollten besser in der Norm für Orientierungsdaten aufgenommen werden.

Die ISO 19101-2 besitzt selbstverständlich eine den Richtlinien des ISO/TC 211 entsprechende Form, besonders was die Verwendung von UML und die Referenzen zu den anderen ISO Normen der 19100-Serie betrifft. Die vor der Entstehung der Richtlinien verabschiedete Norm ISO 19101 „Reference model“ besitzt noch nicht diese Form und soll daher aktualisiert werden.

UML ist die von allen anerkannte Modellierungssprache für Normen der Geoinformatik. In der Diskussion kamen aber Zweifel auf, ob UML auch für ein Referenzmodell die geeignete Sprache sei.

¹ Prof. Dr. Wolfgang Kresse, Hochschule Neubrandenburg, Postfach 110121, 17041 Neubrandenburg, Tel. 0395/5693-355, Fax 0395/5693-399, kresse@hs-nb.de

1.2 ISO 19115-2

Das Committee Draft der ISO 19115-2 „Metadata – Part 2: Imagery and gridded data“ wurde ebenfalls in der ersten Jahreshälfte 2006 fertig gestellt und kommentiert. Hier wurden etwa 400 meist einfach lösbare Kommentare abgegeben.

Einen etwas größeren Aufwand dürfte die noch zu definierende genaue Abgrenzung zwischen der ISO 19115-2, der ISO 19130 „Sensor data models for imagery and gridded data“ und der geplanten Norm zur Sensorkalibrierung bedeuten. Viele beschreibende Datenelemente könnten zwei oder sogar allen drei Normen zugeordnet werden. Dennoch ist eine redundanzfreie Verteilung der Inhalte eine unbedingte Forderung. Das Datenmodell jeder einzelnen Norm muss zudem soweit unabhängig von den anderen bleiben, dass eine individuelle Fortführung möglich bleibt.

Über den „National Body“ DIN waren eine größere Zahl von Kommentaren eingereicht worden, vor allem bezüglich der Photogrammetrie. In der Diskussion des Editing Committees zeigte sich, dass die meisten Forderungen bereits erfüllt waren, allerdings verstreut innerhalb des Dokuments ISO/CD 19115-2 und im Dokument ISO 19115. Um eine international anerkannte und stabile Definition der photogrammetrischen Metadata z.B. bezüglich Bildflug, Kamera und Aerotriangulation aufzubauen, wird die Nutzung der vom ISO/TC 211 entwickelten Registrierung empfohlen, ISO 19135 „Registry“. Daher sind die Definition der ISO-konformen Metadaten für Photogrammetrie und Fernerkundung sowie die Etablierung der die Registrierung pflegenden internationalen Stelle Aufgaben der nächsten Zeit.

1.3 ISO 19129

Die Arbeiten an der ISO 19129 „Imagery, gridded and coverage data framework“ wurden vor einem Jahr wegen Fristüberschreitung offiziell beendet. Diese Norm soll in kürze als New Work Item Proposal (NWIP) wieder eingebracht werden. Einige Inhalte wurden seitens der USA schon in Aussicht gestellt, z.B. einige Grundlagen zu digitalen Höhenmodellen.

1.4 ISO 19130

Das Normungsprojekt ISO 19130 wurde im März 2006 vom ISO Zentralsekretariat offiziell beendet, weil auch hier die maximale Entwicklungszeit von fünf Jahren überschritten wurde. Die Gründe für die Verspätung sind vielfältig. Genannt seien die immer wieder neuen Zusatzwünsche einiger Beteiligten in der Projektgruppe und der Verlust von finanziellen Ressourcen bei der Projektleitung.

Dennoch gelang es, das Dokument nach Ablauf der Frist soweit fertig zu stellen, dass alle Kommentare zum 2. Committee Draft berücksichtigt werden konnten. Das verspätete Dokument steht zurzeit im WG 6-Forum (WG 6 = Working Group 6 „Imagery“ im ISO/TC 211).

Während der Plenarsitzung in Orlando stufen alle Beteiligten die ISO 19130 als dringend benötigt ein. Daher wurde ein weiteres Vorgehen in zwei Stufen vereinbart.

In der Stufe 1 wird die WG 6 in Zusammenarbeit mit dem Sekretariat des ISO/TC 211 die ISO 19130 als NWIP einbringen. Dabei wird das vorhandene Dokument ohne wesentliche Änderung verwendet, jedoch umgewidmet als Technische Spezifikation ISO/TS 19130. Nach der fertig gestellten Einarbeitung aller Kommentare erfordert dieses Vorgehen nur noch eine

formale Abstimmung der stimmberechtigten Mitglieder des ISO/TC 211, bevor die Norm als fertiges und gültiges ISO-Dokument veröffentlicht werden kann.

In der Stufe 2 soll schnellstmöglich ein zweites NWIP für eine modernisierte Version der ISO 19130 eingebracht werden. Dieses NWIP wird zusätzlich die neuen digitalen Sensoren (Luftbildkameras, ALS, IMU usw.) und, soweit Fachkräfte verfügbar sind, Radar und Sonar enthalten. Wichtig werden auch die genaue Abstimmung mit den anderen Normen und eine Überarbeitung der Dokumentstruktur sein. Die Projektleitung liegt wieder in den USA, jedoch diesmal bei einer Partnerfirma des NGA (National Geospatial-Intelligence Agency, ex NIMA, ex DMA). Der Projektleiter wird für beide NWIPs zuständig sein. Die Partnerfirma des NGA hat die Sensordatensprache „Transducer Model Language“ entwickelt (TML). Diese Sprache hat zusammen mit der Sensor Model Language (SensorML) Eingang in ein „Best Practices Paper“ des OGC gefunden.

2 Open Geospatial Consortium

In den vergangenen 12 Monaten fanden drei Treffen statt: November 2005 in Bonn, März 2006 in Huntsville, USA, und im Juni 2006 in Edinburgh, Großbritannien.

Von den vielen Aktivitäten betrifft die Photogrammetrie und die Fernerkundung vor allem das breit angelegte „Sensor Web Enablement“ (SWE). Es gliedert sich in die Komponenten Observations & Measurements (O&M), SensorML, TML, Sensor Observation Service (SOS), Sensor Planning Service (SPS), Sensor Alert Service (SAS) und einen Benachrichtigungsdienst (Web Notification Service, WNS). Ein weiterer Abgleich zwischen den Komponenten ist erforderlich.

Eine aktuelle Herausforderung ist die Zusammenführung von SensorML und TML, die beide unterschiedlich strukturiert sind. Die erstere ist offener und moderner während die zweite den Vorteil der kompletten Implementierung besitzt. Im Vergleich zur ISO 19130 würde sich SensorML oder TML als Implementierungsebene zur abstrakten ISO-Norm anbieten. Dieses ist jedoch ohne einen umfangreichen Abgleich beider Welten nicht möglich, da die einzelnen Sprachen unterschiedliche Bereiche detailliert beschreiben. Die ISO 19130 bildet die photogrammetrischen Belange ausreichend ab, während SensorML im Gegensatz dazu die In-situ-Sensoren enthält. TML ist an ein bestehendes Produkt angelehnt.

3 ISPRS und EuroSDR

Die Kommissionen 1 der ISPRS und von EuroSDR sind thematisch auf die Aufnahmesysteme ausgerichtet. Daher bietet sich eine Zusammenarbeit an, die in Form des gemeinsamen Workshops EuroCOW (Calibration and Orientation Workshop) im Januar in Castelldefels in Spanien erstmals realisiert wurde.

Aus den technischen Diskussionen wurde eine gewisse Reife der neuen Systeme deutlich, z.B. bezüglich des Airborne Laser Scannings und der direkten Georeferenzierung mittels GPS und IMU. Folglich wurde die Forderung erhoben, technische Normen sobald als möglich zu vollenden. Immerhin werden die Ergebnisse des EuroCOW-Workshops und einiger Folgeveranstaltungen wie dem ISPRS-Commission-1-Symposium Mitte 2006 die Vorarbeiten zur überarbeiteten ISO 19130 weiter komplettieren.

4 Zusammenfassung

Dieser Bericht stellt die Aktivitäten von ISO/TC 211 “Geographic information / Geoinformatics”, vom Open Geospatial Consortium (OGC), von ISPRS, und von EuroSDR bezüglich der Normung für Photogrammetrie und Fernerkundung dar. Die ISO 19101-2 und die ISO 19115-2 haben den Status eines Committee Drafts erreicht. Die ISO 19130 wurde wegen Überschreitung der Entwicklungszeit von 5 Jahren beendet, soll aber in Kürze wieder eingebracht werden. Die neue ISO 19130 wird an die vorgenannten neuen ISO-Normen angepasst sein und inhaltlich und strukturell überarbeitet werden. Das OGC hat das SWE weiterentwickelt. SensorML und TML sind jetzt ein „Best Practices Paper“. Die ISPRS und das EuroSDR waren sehr erfolgreich bei der Bündelung von Expertenwissen zu den neuen Sensoren wie Digitaler Luftbildkamera, ALS und IMU. Dieses ebnet den Weg zu den von Fachleuten geforderten Standards.

5 Literaturverzeichnis

- BOTTS, M. (2005): „Sensor Model Language (SensorML) Implementation Specification“, version 1.0, OGC 05-086
- KRESSE, W. & K. FADAIE (2004): „ISO Standards for Geographic Information“, Springer-Verlag
- MORAIN, S. & BUDGE, A.M., Hrsg. (2004): „Post-Launch Calibration of Satellite Sensors“, ISPRS Book Series – Volume 2, Balkema-Verlag
- ISO/CD 19101-2 (2006): „Draft Technical Specification 19101-2 Geographic information – Reference model – Part 2: Imagery“, ISO/Technical Committee 211, document N 1943
- ISO/CD 19115-2 (2006): „Draft Technical Specification 19115-2 Geographic information – Metadata – Part 2: Metadata for imagery and gridded data“, ISO/Technical Committee 211, document N 1931

Zertifizierung von Software zur Bündelausgleichung in der Nahbereichsphotogrammetrie

THOMAS LUHMANN¹, JÜRGEN PEIPE² & WERNER TECKLENBURG³

Zusammenfassung: Es wird vorgeschlagen, Softwaretests auf der Grundlage simulierter Daten vorzunehmen, um die Leistungsfähigkeit kommerzieller Programme zur Bündelausgleichung in der Nahbereichsphotogrammetrie zu untersuchen. Der Beitrag soll eine Diskussion über die Notwendigkeit und sinnvolle Vorgehensweisen einer Zertifizierung dieser Software in Gang setzen.

1 Einleitung

Zur Abnahme und Überwachung optischer 3D-Messsysteme hat sich in den letzten Jahren die VDI/VDE-Richtlinie 2634 bewährt. In Blatt 1 werden Messsysteme mit punktförmiger Antastung behandelt. Sie bestehen in der Regel aus einer oder mehreren Digitalkameras, einem Rechner mit Software zur Bildmessung, Bildorientierung und 3D-Objektrekonstruktion sowie Systemmaßstäben u.ä.. Als Messobjekt wird in der Richtlinie ein räumlicher Prüfkörper vorgeschlagen, der eine Mindestzahl von kalibrierten Testlängen in einer empfohlenen Anordnung zur Verfügung stellt. Weitere Einflussfaktoren wie zum Beispiel Zahl und Anordnung der Aufnahmen, Messalgorithmen und Automatisierungsgrad des Messablaufs bleiben dem Hersteller des Messsystems vorbehalten. Als Ergebnis und damit als Kriterium für die Güte eines Messsystems werden Längenmessabweichungen als Differenzen der kalibrierten Testlängen und der aus der photogrammetrischen Messung abgeleiteten Werte bestimmt.

Während in der VDI/VDE-Richtlinie das Messsystem insgesamt betrachtet wird, kann man natürlich auch allein die Qualität der 3D-Berechnungssoftware und der mit ihr bestimmten Daten untersuchen. Dies kann sinnvoll sein, wenn man z.B. die durch Simultankalibrierung innerhalb einer Bündelausgleichung ermittelten Parameter der inneren Orientierung einer Kamera in einer anderen Software weiter verwenden will. Untersuchungen zu diesem Thema wurden in letzter Zeit durchgeführt (PEIPE & TECKLENBURG, 2006; REMONDINO & FRASER, 2006). Ausgehend von einem realen Bilddatensatz wurden die Kalibrierparameter einer bestimmten Kamera durch Simultankalibrierung mit mehreren kommerziellen photogrammetrischen Bündelausgleichungsprogrammen berechnet und miteinander verglichen (Kap. 2).

Erweitert man den Softwaretest auf die Bestimmung von 3D-Objektkoordinaten, so erhält man eine klare Aussage zur Leistungsfähigkeit der untersuchten Programme. Im folgenden sollen Möglichkeiten und Bedingungen für eine Überprüfung und eventuelle Zertifizierung von Software zur Bündelausgleichung in der Nahbereichsphotogrammetrie diskutiert werden. Wesentliche Grundlage hierfür ist ein geeigneter Satz von Beobachtungen. Dies können zum Beispiel simulierte Daten sein, basierend auf realen Datensätzen, die bestmögliche Voraussetzungen für die Bündelausgleichung bieten (Aufnahmekonfiguration, Zahl der Bilder, Datum, Maßstäbe etc.). Zum Schluss dieses Berichts werden Vorschläge zum organisatorischen Ablauf einer möglichen Zertifizierung gemacht.

¹ Prof. Dr.-Ing. Thomas Luhmann, Fachhochschule Oldenburg/Ostfr./Whv., Institut für Photogrammetrie und Geoinformatik, e-mail: luhmann@fh-oldenburg.de

² Dipl.-Ing. Jürgen Peipe, Universität der Bundeswehr München, Institut für Photogrammetrie und Kartographie, e-mail: j-k.peipe@unibw-muenchen.de

³ Dipl.-Ing. Werner Tecklenburg, Fachhochschule Oldenburg/Ostfr./Whv., Institut für Photogrammetrie und Geoinformatik, e-mail: tecklenburg@fh-oldenburg.de

2 Softwaretest: Untersuchungen zur Kamerakalibrierung

Photogrammetrische Kamerakalibrierung wird heutzutage in der Regel als Selbstkalibrierung (Simultankalibrierung) zusammen mit der Objektrekonstruktion durchgeführt, d.h. die Parameter der inneren Orientierung (Kamerakonstante, Hauptpunktlage) und Bildfehler beschreibende Funktionen (Verzeichnung etc.) werden innerhalb der Bildtriangulation durch Bündelausgleichung simultan mitbestimmt. Allerdings ist Simultankalibrierung nicht immer möglich, vor allem wenn die Aufnahmeconfiguration hierfür nicht geeignet ist. In diesem Fall sind vorab ermittelte Daten der inneren Orientierung (zum Beispiel aus einer Testfeldkalibrierung) für die photogrammetrische Auswertung erforderlich. Auch kann es sinnvoll oder notwendig sein, die mit einer Software berechneten Kalibrierdaten innerhalb einer anderen Software zu verwenden.

Für den Vergleich verschiedener Softwarepakete, mit denen Simultankalibrierung möglich ist, kann man einen realen, unter optimalen Bedingungen erzeugten Bilddatensatz oder simulierte Daten verwenden. In PEIPE & TECKLEBURG (2006) wurde ein räumliches Testfeld mit kreisförmigen Zielmarken benutzt, das nach den Vorgaben der VDI/VDE-Richtlinie 2634/Blatt 1 für die Überprüfung optischer 3D-Messsysteme mit punktförmiger Antastung eingerichtet wurde (VDI/VDE, 2002). Der erzeugte Bildverband enthielt 60 konvergente, teilweise um die Aufnahmeichtung gewälzte Aufnahmen. Als Kamera kam eine Rollei d7 metric⁵ zum Einsatz. Diese 5 Megapixel Kamera weist einige Eigenschaften metrischer Kameras auf, zum Beispiel feste Brennweite, feste Fokussierung und eine stabile Verbindung zwischen Objektiv und Sensor. Damit ist für bestmögliche Stabilität der Kalibrierparameter während einer Aufnahmeserie gesorgt (PEIPE & STEPHANI, 2003).

Die zur Kamerakalibrierung eingesetzten vier Bündelausgleichungsprogramme basieren alle auf dem gleichen mathematischen Modell (Kollinearitätsbedingung mit zusätzlichen Beobachtungen/Parametern) und erlauben die Berechnung der Kamerakonstante, der Lage des Bildhauptpunkts im Bildkoordinatensystem sowie der radial-symmetrischen und der tangentialen bzw. Dezentrierverzeichnung. Als Ergebnis der Simultankalibrierungen wurden Übereinstimmungen bei der Kamerakonstante und der Lage des Bildhauptpunktes und geringe Abweichungen bei den Verzeichnungsparametern festgestellt (PEIPE & TECKLEBURG, 2006).

3 Softwaretest: Simulierte Daten und Aufnahmeconfiguration

Die in Kap. 2 genannten Tests zur Kamerakalibrierung wurden mit realen Bildern und Messdaten durchgeführt. Dies kann unter Umständen zu fehlerhaften Ergebnissen und Schlüssen führen, da lediglich ein Spezialfall untersucht wird - andere (reale) Datensätze können durchaus zu unterschiedlichen Resultaten führen. Bei simulierten Daten hingegen besteht die Gefahr, dass nicht alle Faktoren mitberücksichtigt sind, die bei Aufgabenstellungen in der Praxis auftreten. So bietet es sich an, die Simulation auf der Grundlage einer realen, optimierten Aufnahmeanordnung vorzunehmen (EL-HAKIM et al., 2003; HASTEDT et al., 2005). Ein geeignetes photogrammetrisches Netzwerk lässt sich zum Beispiel bei der Vermessung von Prüfkörpern nach VDI/VDE 2634/Blatt 1 realisieren. Es ist gekennzeichnet durch eine große Anzahl konvergenter auf das Objekt gerichteter Aufnahmen, so dass jeder Objektpunkt - gut definierte Zielmarke - in mindestens fünf Bildern erscheint, und ergänzende Aufnahmen, die eine präzise und zuverlässige Simultankalibrierung der Kamera ermöglichen. Dabei kommt es nicht so sehr auf die Zahl der Bildpunkte an, sondern mehr auf ihre geeignete Verteilung in den Bildern und auf die Abbildungsqualität. Im übrigen kann hier auf Erfahrungen aus einem

Vergleichstest aus dem Jahre 1996 zurückgegriffen werden, bei dem die Leistungsfähigkeit verschiedener digitaler Punktmessalgorithmen anhand synthetischer und realer Bilder untersucht wurde, und zwar durch Analyse im Bildraum und - nach Bündelausgleichung - im Objektraum (LUHMANN, 1996).

Bei der Berechnung der Simulationsdaten werden die tatsächlich gemessenen Bildkoordinaten durch neu berechnete ersetzt. Dies geschieht auf der Basis der 3D-Koordinaten des zugehörigen Objektpunktes, der äußeren Orientierung des Bildes sowie der inneren Orientierung der Kamera durch Nutzung der Kollinearitätsgleichungen. Der berechnete Bildpunkt wird anschließend um einen zufälligen Fehler (t-Verteilung), innerhalb der angenommenen Messgenauigkeit, verschmiert. In diesem Prozess können auch die Parameter der inneren Orientierung für jedes Bild variiert werden, wenn eine Instabilität der verwendeten Kamera angenommen wird. Dies geschieht wiederum auf der Basis t-verteilter Zufallswerte (HASTEDT et al., 2005).

Für den Test von Softwarepaketen zur Bündelausgleichung durch Vergleich der ermittelten 3D-Objektkoordinaten signalisierter Punkte mit den Sollkoordinaten dieser Punkte werden zwei Aufnahmekonfigurationen vorgeschlagen. Zum einen ein Bildverband, wie bereits mehrfach benannt, bestehend aus von allen Seiten konvergent auf das Objekt gerichteten Aufnahmen. Verschiedene Aufnahmehöhen und gewälzte Aufnahmen (ca. 10 % der Gesamtzahl) sollten enthalten sein. Die Zahl der Bilder und Bildpunkte könnte bei ca. 100 angesetzt werden. Ein ähnlicher Bildverband mit einer wesentlich geringeren Zahl von Bildern und Punkten wäre zusätzlich denkbar. Ein kalibrierter Maßstab - oder auch mehrere, z.B. in den drei Koordinatenrichtungen angebracht - könnte mitgeführt werden. Zum anderen wird die photogrammetrische Bestimmung eines völlig ebenen Objekts vorgesehen.

Die Bündelausgleichung sollte in jedem Fall als freie Netzausgleichung bzw. durch zwangsfreie Einpassung auf die minimal notwendige Objektinformation (3-2-1 Methode) geschehen. Der Vergleich der resultierenden 3D-Objektkoordinaten der verschiedenen Rechenprogramme mit den Sollwerten erfolgt durch räumliche Ähnlichkeitstransformation.

Es ist sicher nicht möglich, alle Funktionalitäten der untersuchten Bündelprogramme abzufragen. Eine "Grundmenge" ist zu wählen, die allen Programmen gemeinsam ist. Dies betrifft im Wesentlichen den Lösungsalgorithmus zur Bestimmung der 3D-Objektkoordinaten, inklusive der Kamerakalibrierung mit einem festgelegten Satz von Parametern. Weitere zusätzliche Beobachtungen bzw. Parameter in Bild- und Objektraum werden nicht eingeführt. Die simulierten Daten sollen keine groben Fehler enthalten - Maßnahmen zur Fehlersuche bleiben in dieser ersten Phase der Untersuchung ausgeklammert. In späteren Tests könnten auch grobe Fehler im Datensatz enthalten sein - oder es wird zum Beispiel ein Bildverband mit stark verzeichnenden Objektiven erzeugt, wie sie in digitalen Kompaktkameras vorhanden sein können.

4 Softwaretest: Zertifizierung ?

Die Bewertung der Leistungsfähigkeit kommerzieller Software ist sicher sinnvoll, zugleich aber ein heikles Thema. Der hier als "Zertifizierung" bezeichnete Vorgang - was auch immer letztlich im Detail darunter zu verstehen ist - muss von Herstellern und Käufern einer Software anerkannt sein und Vertrauen genießen.

Geht man davon aus, dass mehrere Sätze simulierter Daten via Website zur Verfügung stehen, dann könnten die Softwarehersteller sie herunter laden und ihre Resultate zurückschi-

cken, wenn sie an dem Test teilnehmen wollen. Stimmen die Ergebnisse mit den Vorgaben überein, so erscheinen Hersteller und Produkt auf der Website unter der Rubrik "Zertifizierte Programme zur Bündelausgleichung". Wenn nicht, wird dies dem Hersteller mitgeteilt, ohne dass ein Eintrag auf der Website erfolgt. Er kann dann erneut Ergebnisversionen einsenden oder auf eine weitere Teilnahme am Test verzichten.

Es ist wünschenswert, dass ein "offizielles" Gremium über das ganze Verfahren wacht und für die Ausstellung des Zertifikats zuständig ist. Hierfür wäre - nach Meinung der Autoren - durchaus einer der beiden Arbeitskreise der DGPF "Internationale Standardisierung" oder "Nahbereichsphotogrammetrie", vertreten durch den jeweiligen Arbeitskreisleiter, geeignet und/oder die DGPF selbst. Die Überlegungen zur Zertifizierung könnten auch innerhalb des FA 3.32, des gemeinsamen Fachausschusses "Optische 3D-Messtechnik" des VDI/VDE und der DGPF stattfinden, der die VDI/VDE-Richtlinie 2634 erarbeitet hat. Eine weitere Möglichkeit ist die Beteiligung bzw. Federführung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig, die sich ja intensiv mit Kalibrierproblemen beschäftigt.

5 Abschließende Bemerkungen

Dieser Beitrag versteht sich als Versuch, eine Ideensammlung und Diskussion zum Thema "Zertifizierung von Software zur Bündelausgleichung in der Nahbereichsphotogrammetrie - oder nicht" zu initiieren.

Die Autoren halten eine Prüfung der Software anhand der ermittelten 3D-Koordinaten für sinnvoll. Aber es sind viele Fragen offen; zum Beispiel:

- Wird eine Zertifizierung der Bündelausgleichungssoftware wirklich benötigt? Genügt nicht die Systemüberprüfung nach VDI/VDE 2634?
- Für welchen Zeitraum kann eine solche Zertifizierung gelten, da doch die Rechenprogramme ständig weiterentwickelt werden?
- Ein simulierter Datensatz enthält eine bestimmte Modellvorstellung - vor allem auch für die Modellierung im Bildraum -, die im Wesentlichen den momentanen Stand der Technik wiedergibt. Was passiert mit neu entwickelten Modellierungsansätzen, die nicht in das Zertifizierungsschema passen, aber vielleicht bessere Ergebnisse liefern, überprüft im Objektraum mit Hilfe der Richtlinie 2634?

6 Literaturverzeichnis

- EL-HAKIM, S.F., BERARDIN, J.-A. & F. BLAIS, 2003: Critical Factors and Configurations for Practical Image-Based 3D Modeling. In: Proceedings "Optical 3-D Measurement Techniques VI" (Hrsg. A. Grün & H. Kahmen), Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, S. 159-167.
- HASTEDT, H., LUHMANN, T. & W. TECKLENBURG, 2005: Simulationsbasiertes Systemdesign für die optische Messtechnik nach VDI/VDE 2634. In: Publ. DGPF, Bd. 14 (Hrsg.: E. Seyfert), Potsdam, S. 319-326.
- LUHMANN, T., 1996: Results of the German Comparison Test for Digital Point Operators. Int. Arch. Photogrammetry & Rem. Sensing, Vol. 31/B5, Wien, S. 324-329.
- PEIPE, J. & M. STEPHANI, 2003: Untersuchungen zur Stabilität und metrischen Qualität einer digitalen 5 Megapixel Messkamera. In: Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Oldenburger 3D-Tage 2003 (Hrsg.: T. Luhmann), Wichmann, Heidelberg, S. 51-56.

- PEIPE, J. & W. TECKLENBURG, 2006: Vergleich von Softwaretools zur Kamerakalibrierung.
In: Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Oldenburger 3D-Tage
2006 (Hrsg.: T. Luhmann & Ch. Müller), Wichmann, Heidelberg, S. 106-111.
- REMONDINO, F. & C. FRASER, 2006: Digital Camera Calibration Methods: Considerations
and Comparisons. Proceedings ISPRS Commission V Symposium, Dresden, 25.-27. Sept.
2006 (im Druck).
- VDI/VDE (2002): VDI/VDE-Richtlinie 2634. Beuth Verlag, Berlin.

Zielsetzung und Anwendung der Normen DIN 18740-1, 18740-2 und 18740-3

MANFRED WIGGENHAGEN¹

Zusammenfassung: In den vergangenen Jahren wurden vom DIN-Arbeitsausschuss 03.02 „Photogrammetrie und Fernerkundung“ vier Normen vollständig neu ausgearbeitet und veröffentlicht. In diesem Beitrag sollen die Zielsetzungen der Normen DIN 18740-1 bis 18740-3 näher betrachtet und über erste Reaktionen aus der Praxis zur Anwendung dieser Standards berichtet werden.

1 Einleitung

Im Jahr 1996 wurde auf der DIN-Arbeitsausschusssitzung des Arbeitskreises 03.02 „Photogrammetrie und Fernerkundung“ beschlossen, die zukünftige Normungsarbeit auf ausgewählte photogrammetrische Produkte zu konzentrieren. Da der gesamte photogrammetrische Aufnahme- und Auswerteprozess sehr komplex ist und als solcher nur schwer genormt werden kann, wurden in den vergangenen Jahren zunächst die nachfolgend genannten Produkte näher beschrieben und in den jeweiligen Normblättern spezifiziert:

- Anforderungen an Bildflug und analoge Luftbilder (18740-1: 11/2001),
- Anforderungen an das gescannte Luftbild (18740-2: 2/2005),
- Anforderungen an das Orthophoto (18740-3: 10/2003),
- Digitale Luftbildkameras und digitale Luftbilder (18740-4: 6/2006).

Da die Normen 18740-1 bis 18740-3 bereits vor einigen Jahren fertig gestellt wurden, kann in diesem Beitrag bereits über Bewertungen aus der Praxis berichtet werden.

2 Zielsetzungen

Grundsätzlich bauen die drei hier behandelten Normen auf den existierenden Definitionen aus den Normblättern DIN 18716-1 bis 18716-3 auf. Weiterführende Begriffsbestimmungen und wichtige technische und prozesstypische Zusammenhänge wurden dann neu aufgenommen, wenn sie für das Verständnis und die Anwendung der aktuellen Norm notwendig waren. Wichtig für die Qualitätskontrolle waren z.B. zusätzliche Hinweise zur Prüfung der jeweiligen Produkte, die anhand von unterschiedlichen Prüfverfahren und Prüfmitteln zu bewerten sind. Um dem Nutzer möglichst nachvollziehbare Prüflisten zur Verfügung zu stellen, wurden zusätzliche Beispiele und Spezifikationen aufgenommen, die teilweise keinen normativen sondern nur informativen Charakter haben. Vom Nutzer können diese Anhänge wie Checklisten genutzt werden, in denen in möglichst komprimierter Form alle normrelevanten Bedingungen eingetragen und spezifiziert werden. Diese Checklisten sind als Unterstützung des Dialoges zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer gedacht und sollten in der Praxis möglichst weite Verbreitung finden.

¹ Dr.-Ing. Manfred Wiggenhagen, Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, Nienburger Str.1, 30167 Hannover, email: wiggenhagen@ipi.uni-hannover.de

2.1 DIN 18740-1 Anforderungen an Bildflug und analoge Luftbilder

In dieser Norm sind alle Spezifikationen aufgenommen worden, die den typischen Bildflug bei der Aufnahme analoger Luftbilder und daraus abgeleiteten Produkte beschreiben (siehe auch NEUMANN, K. & SCHWEBEL, R., 2003). Im Detail werden folgende Anforderungen näher spezifiziert:

- Instrumentarium
 - Luftbildkamera, System für Positionsbestimmung
- Prozesse
 - Aufnahme, Filmentwicklung
- Produkte
 - Filme und daraus abgeleitete Produkte, Hilfsdaten
- Dokumentation des Bildflugs

Wesentliche Anforderungen an den Bildflug wurden in der Vergangenheit bereits auch ohne diese Norm zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer geregelt (KIEFER, L., 2002). Aufgrund mangelnder Erfahrung gab es aber oft Probleme bei der Auftragsabwicklung, wenn z.B. grundlegende Rahmenbedingungen nicht definiert oder vernachlässigt worden waren. Als praxisrelevant und damit in der Norm sehr wichtig wurden von den Anwendern die Anforderungen zum Kamerasystem und der Abbildungsqualität angesehen (DÖRSTEL, C. & SCHWEBEL, R., 2005). Weniger relevant sind Einzelfestlegungen zur angestrebten Genauigkeit der satellitengestützten Positionsbestimmung. Der Einsatz von differentiellem GPS und Referenzmessungen durch den Auftragnehmer wird heute nahezu als Standard angesehen. Besondere Bedingungen im Bildflug und beim Einsatz des Bildflugzeuges werden abweichend zur Norm kaum bestätigt. Aus praktischer Sicht haben die Festlegungen zur Überdeckungsregelung wie z.B. die maximale Abweichung der Längs- oder Querüberdeckung kaum eine Bedeutung. Im Bereich der Filmnutzung und der Entwicklung des belichteten Materials werden die heute verfügbaren Materialien eingesetzt. Nähere Spezifikationen zum Dichteumfang der Filme werden eher selten vorgenommen. Die Lieferung des Bildflugmaterials wird heute bereits vielfach in analoger und gleichzeitig digitaler Form als Ergebnis eines zwischen geschalteten Scanprozesses vorgesehen. Festlegungen zur Aufbereitung analoger Kontaktabzüge und die genaue Spezifikation der verwendeten digitalen Datenträger für das Datenmaterial hat daher kaum noch eine große Relevanz.

2.2 DIN 18740-2 Anforderungen an das gescannte Luftbild

Diese Norm befasst sich mit dem Prozess der Digitalisierung analoger Luftbilder durch photogrammetrische Rasterscanner. In das Normwerk aufgenommen wurden notwendige Definitionen und Spezifikationen die sich sowohl geometrisch als auch radiometrisch am aktuellen Stand der Technik orientieren. Die Norm enthält Hinweise zur Prüfung der gescannten Ergebnisse, ermöglicht die Planung von Scannaufträgen sowie die Qualitätsbeurteilung der gescannten Bilder. Durch die Festlegung von Spezifikationen und Prüfkriterien zur Steuerung des Produktionsprozesses können reproduzierbare Ergebnisse gewährleistet werden.

In den Definitionen werden Begriffe erläutert, die früher im Dialog zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer zu Problemen führten. Die Begriffsbestimmungen für z.B. die optische Dichte, radiometrische Dynamik, Bildtiefe und geometrische Auflösung wurden auf die praxisrelevanten Anforderungen im Scannbetrieb abgestimmt. Es wurde bei der Auslegung

der Norm keine Produktnormung angestrebt, sondern es wurden vielmehr Minimalanforderungen zur Erfüllung der gesetzten Qualitätsansprüche an gescannte Luftbilder definiert.

Für die radiometrische und geometrische Prüfung werden Vorschläge zum Prüfverfahren und für geeignete Prüfmittel gemacht. Im Anhang der Norm wird neben der Spezifikation als Checkliste auch ein Prüfprotokoll angeboten, das je nach Bedarf genutzt werden kann.

Im Allgemeinen ist die größte Zahl der in der Spezifikation genannten Parameter relevant für die Praxis. Probleme ergeben sich eher aus der Fragestellung wie oft und wie die geometrische und radiometrische Prüfung durchgeführt werden muss. Operationelle Scanner bieten bereits automatisierte Kalibrierungen an, die es dem Anwender ermöglichen in kurzer Zeit die relevanten Geräteparameter zu bestimmen und ein Kalibrierungsnachweis für die Geometrie und Radiometrie zu liefern. Je nach Hersteller ist es allerdings fraglich, ob alle in der Norm geforderten Parameter mit der jeweiligen Auswertesoftware dokumentiert werden können.

Nicht jedem Anwender stehen hochgenaue Prüfmittel wie z.B. kalibrierte Gitterglasplatten oder kalibrierte Graukeile zur Verfügung. Hier erscheint als Unterstützung ein unabhängiges Gremium zur Überprüfung von Scanneinrichtungen sinnvoll. In frühen Diskussionen wurde aus Nutzersicht kritisiert, dass es übertrieben und unwirtschaftlich sei für jedes gescannte Bild eine Spezifikation und einen Prüfbericht zu verfassen. Dieses ist nicht Ziel der Norm DIN 18740-2, sondern vielmehr das Bewusstsein unerfahrener Auftraggeber und Auftragnehmer zu schärfen, um für ganze Projekte und nicht nur für einzelne Bilder die notwendigen Qualitätsanforderungen erfüllen zu können.

2.3 DIN 18740-3 Anforderungen an das Orthophoto

In diese Norm wurden Qualitätsanforderungen zur Gewährleistung reproduzierbarer Ergebnisse und Festlegungen von Spezifikationen und Prüfkriterien zur Steuerung des Produktionsprozesses formuliert.

Da das Produkt Orthophoto auf mehreren photogrammetrischen Vorprodukten basiert, wie z.B. analogem bzw. digitalem Messbild und Digitalem Höhenmodell, werden zusätzliche Parameter als Prüfkriterien definiert, die eine Eingrenzung der Fehlerquelle bei nicht erfüllten Qualitätsanforderungen im Ergebnis ermöglichen. Die Prüfung von Orthophotoprodukten wird unterteilt in analoge und digitale Orthophotoausgaben. Eine wesentliche Größe bei der Planung von Orthophotoausgaben ist die geometrische Auflösung des digitalen Orthophotos, die sich an der Erkennbarkeit der kleinsten interessierenden Objekte im Bild orientiert. In der Norm wird in Abhängigkeit vom Verwendungszweck für die geometrische Auflösung des digitalen Messbildes ein Pixelabstand von 30 μm und kleiner gefordert. In der Praxis wird häufig der Wert 21 μm beauftragt.

Die Bildtiefe wurde mit mindestens 8-bit pro Farbkanal gefordert. Tatsächlich wird in den meisten Anwendungen 24-bit für ein Farbbild mit den drei RGB-Kanälen verwendet. Nicht überprüfte digitale Höhenmodelle mit punktuellen Höhenfehlern, fehlenden Bruchkanten oder Interpolationslücken haben direkten Einfluss auf die geometrische Qualität des Orthophotos. Eine Überprüfung des Ausgabeproduktes muss diese Fehler möglichst aufdecken können. Die im Prüfbericht der Norm aufgeführten qualitativen und quantitativen Prüfungen können in der Praxis jedoch nur in wenigen Fällen vollständig durchgeführt werden. Ebenso verhält es sich mit Fehlern, die beim Scannprozess das digitale Messbild verfälscht haben. Besonders kritisch sind hier Farbränder bei streifenweisem Scannen und radiometrisch nicht oder nur unzulänglich kalibrierte Scanner (WIGGENHAGEN, M. & WIBMANN, U., 2003).

Bei der Berechnung von Orthophotomosaiken spielt die eingesetzte Mosaiksoftware eine wichtige Rolle. Für die Beschleunigung des Produktionsablaufes sind zwar automatisierte Schnittkantenberechnungen interessant, in vielen Fällen muss jedoch manuell nacheditiert werden, um unerwünschte Artefakte z.B. im Bereich von Dachfirsten zu vermeiden. Inzwischen wird in der operationellen Verarbeitung auf Objektinformation des ALK zurückgegriffen. Durch Überlagerung dieser Vektorinformation über dem Orthophoto können sehr schnell Hinweise auf Fehler im geometrischen Produktionsprozess gefunden werden.

3 Schlussbemerkung

Ziel der vorgestellten Normen ist die Definition von Qualitätsanforderungen zur Gewährleistung reproduzierbarer Ergebnisse. Über die Festlegung von Spezifikationen und Prüfkriterien zur Steuerung des Produktionsprozesses sollen Diagnosemöglichkeiten gegeben werden und durch standardisierte Prüfprotokolle und Anforderungsprofile sollen Missverständnisse im Dialog zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer vermindert werden. Als negativ wurde aus der Praxis gemeldet, dass die große Menge an Parametern zunächst abschreckende Wirkung bei der Nutzung der Normen hatte. Nach näherer Einarbeitung in die jeweilige Thematik wurde aber festgestellt, dass gerade die qualitätsbeeinflussenden Größen große Bedeutung bei der Durchführung von Projekten haben und unbedingt beachtet werden sollten. Als schwierig wird die Bestimmung mancher geometrischer und radiometrischer Prüfgrößen in den digitalen Produkten angesehen, da nicht jeder Anwender über die notwendigen Prüfmittel und Softwarelösungen verfügt. Hier erscheint der Einsatz eines übergeordneten unabhängigen Prüfungsgremiums, das mit den notwendigen Mitteln ausgestattet sein müsste, sehr sinnvoll.

4 Literatur

- KIEFER, L. , 2002: Ausschreibungen von Bildflügen, Erfahrungen der Flurneunordnungs-
erhaltung Baden-Württemberg. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für
Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Band 11, Eckhardt Seyfert
(Hrsg.), S. 291-293.
- NEUMANN, K. & SCHWEBEL, R. , 2003: Normentwurf für gescannte Luftbilder, Publikationen
der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und
Geoinformation, Band 12, Eckhardt Seyfert (Hrsg.), S. 157-162.
- WIGGENHAGEN, M. & WIBMANN, U. , 2003: Untersuchungen zur Prüfung digitaler
Photogrammetrischer Produkte nach DIN 18740, Publikationen der Deutschen
Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Band 12,
Eckhardt Seyfert (Hrsg.), S. 163-170.
- DÖRSTEL, C. & SCHWEBEL, R. , 2005: Qualitätsstandards für photogrammetrische Produkte
und deren Umsetzung. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für
Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Band 14, Eckhardt Seyfert
(Hrsg.), S. 149-153.

Investigation of land use and land cover change in the Southern Ecuadorian Andes

GOERNER, A.¹, GLOAGUEN, R.¹, MAKESCHIN, F.²

Zusammenfassung: Ecuador, bekannt für seine außerordentlich hohe Artenvielfalt, ist das südamerikanische Land mit der höchsten Entwaldungsrate. Angelehnt an ein DFG-Projekt zur Untersuchung der Funktionalität in einem tropischen Bergregenwald Ecuadors, erarbeitet diese Studie einen pixelbasierten Algorithmus zur Detektion der Landnutzungsänderung über einen Zeitraum von Jahrzehnten. Die Methode basiert auf der Klassifizierung der Haupt-Landbedeckungsformen des Untersuchungsgebietes (Wald, Weide, Sukzessionsareale und kaum bewachsenen Flächen - v.a. Erdrutsche, Straßen, Flussbetten) anhand einer Grenzwertbildung von NDVI und SAVI sowie einer überwachten Klassifizierung von Landsat-Daten. Die Zuverlässigkeit der Klassifizierung konnte durch Kreuzvalidierung belegt werden. Eine visuelle Überprüfung der Resultate der Änderungsanalyse zeigt, dass unveränderte Landnutzung und Entwaldung größtenteils richtig erkannt werden.

1 Introduction

Of all South American countries, Ecuador has the highest deforestation rate (FAO 2005). Since it is also considered as a hot spot of biodiversity (BRUMMITT & LUGHADHA 2003), it is urgent to investigate the diversity, dynamic processes, and utilization potentials in this region under ecosystem perspectives. Since 1997 the large DFG-funded research unit “Tropischer Bergregenwald” (FOR 402) is exploring the functionality in a tropical mountain rainforest in Southern Ecuador. For this purpose it is interesting to get an overview of the evolution of the land cover during the past decades. We chose a 20x15 km large area between the provincial capitals Loja and Zamora (cf. Fig. 1). It comprises primary mountain rain forest (including the main research area of the DFG group), pastures, abandoned pastures and succession areas. Another dominant feature are landslides, which occur both naturally due to the steep slopes and are triggered by the construction of roads and other infrastructure. The currently available global or continental land cover data sets (e.g. GLC2000) have a coarse resolution and do only exist since a few years. We created a change detection procedure tailored to the conditions in the area of investigation. The Landsat sensor series provides a good temporal coverage as well as a reasonable spectral and spatial resolution and was therefore chosen as a data source.

¹ Institut für Geologie, TU Bergakademie Freiberg, Bernhard-von-Cotta-Str. 2, 09699 Freiberg, e-mail: anna_goerner@web.de

² Institut für Bodenkunde und Standortslehre, TU Dresden, Piener-Str. 19, 01737 Tharandt

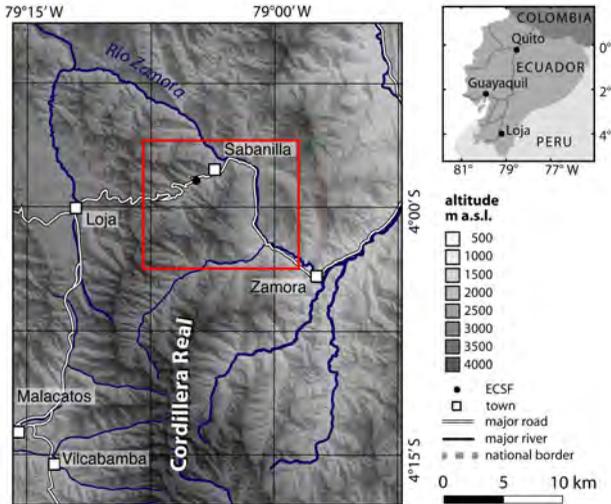


Fig. 1: location of the study area (red box)

2 Methods

Vegetation indices play a dominant role in the classification scheme developed in this study (cf. Fig. 2). Since they are based on surface reflection in the red and infrared satellite bands, they can represent biophysical properties of the land cover (STEVEN 2003).

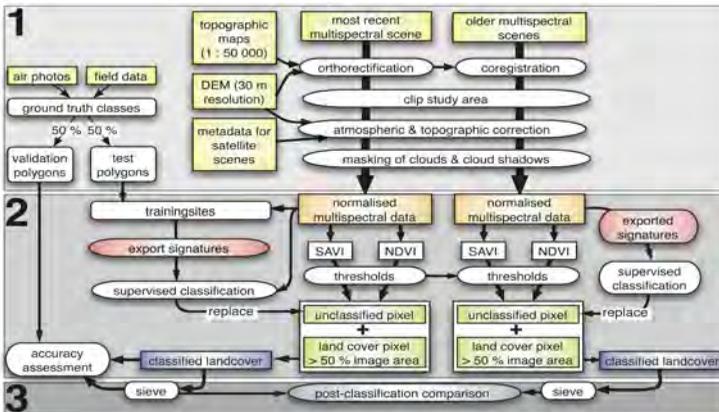


Fig. 2: workflow for the land cover classification and land cover change detection (1: pre-processing, 2: classification, 3: post classification processing)

Preprocessing

Eight Landsat scenes (WRS 2: path 10, row 63; cf. Tab. 1) with acceptable cloud cover are available. Only in the most recent scene the study area is completely free of clouds.

Tab. 1: available Landsat scenes with root mean square error for orthorectification (2001 p) and coregistration

sensor	acquisition date	sun elevation	sun azimuth	RMS
ETM+	03/11/2001	61.9	114.6	p: 3.07; xs: 1.06; t: 1.86
ETM+	31/10/2000	62.6	113.2	p: 0.23; xs: 0.69
ETM+	20/10/1999	63.5	111.7	p: 0.16; xs: 1.12; t: 1.00
TM	26/03/1987	51.0	81.2	0.69
TM	02/11/1986	55.2	109.8	0.16
MSS	12/09/1985	54.0	76.0	0.51
MSS	20/03/1985	52.0	84.0	0.39

The panchromatic band of the 2001 scene was orthorectified by means of a 30 m resolution digital terrain model (DTM) generated from topographic maps by SOURIS (2002) and 1:50 000 topographic maps. The other spectral bands of that scene were coregistered to the panchromatic band. After coregistration of the other scenes with the 2001 scene, subsets of the study area were created. We used the algorithms proposed by Richter (1996, 1998) to perform an atmospheric correction on subsets of each scene to correct the multispectral and thermal bands for the effects of differing illumination, atmospheric disturbances, and topography. For that purpose the DTM was resampled with cubic convolution to match the resolution of each scene. The masking of clouds and cloud shadows completed the preprocessing of the Landsat data.

Ground truth was obtained from field measurements in 11/2005. Areas with homogeneous vegetation cover have been documented with GPS measurements, photographs and notes. Mosaiced orthophotos (RGB: 2002; BW: 2000, 2003) were used to get an overview of the inaccessible parts of the study area and to delineate 225 polygons of 14 ground truth classes. The classification criterions were established in order to cover the dominating forms of land use. These original ground truth classes can be distinguished even from a larger distance, such as the opposite site of a valley or even from aerial photographs – essential for the inaccessible parts of the study area. The ground truth polygons chosen in such a way that buffer zones separate the polygons from current transitions in land cover. Therefore we can assume, that possible migrations of land cover transition zones in between 2001 (most recent satellite scene) and 2005 (field measurements) did not influence the ground truth data.

Tab. 2: original ground truth classes

code	land cover	number of polygons			number of pixel
		total	test	validation	total
1	bracken + small bushes	29	14	15	151
2	reforestation site	2	1	1	49
3	shrubbery	18	9	9	63
4	secondary forest	1	1	0	0
5	mature forest	43	22	21	275
6	wood pasture	2	1	1	17
7	pasture with trees	15	7	8	391
8	pasture	39	20	19	261
9	páramo	3	2	1	66
10	ridge vegetation	1	1	0	14
11	landslide	45	23	22	91
12	road	12	6	6	16
13	banana plantation	1	1	0	4
14	river	10	5	5	18

The ground truth polygons were randomly declared as either validation polygons or test polygons.

Classification

From the normalised multispectral data we computed the normalised differential vegetation index (NDVI) according to Rouse (1973) and the soil adjusted vegetation index (SAVI) as proposed by Huete (1988) for the whole study area. Since a preliminary test (plot of the vegetations indices for all pixels within the test polygons (test pixels) vs. the 14 original ground truth classes) revealed insufficient signature separabilities, the ground truth classes were aggregated (cf. Tab. 3).

Tab. 3 aggregated ground truth classes

code	land cover	polygon number			pixel number
		total	test	validation	total
1	bracken + small bushes	29	14	15	151
2	reforestation site + shrubbery	20	10	10	109
3	forest + secondary forest + wood pasture	46	24	22	287
4	pasture (with trees) + páramo + ridge vegetation	58	30	28	643
5	sparse vegetation (landslides, roads, riverbed)	45	23	22	91

In the first step of classification we intended to assign as many pixels to classes as possible with maximum accuracy. To solve this optimisation problem, we determined class thresholds according to the visual separability of classes in a NDVI-SAVI plot of all test pixels (cf. Fig. 3).

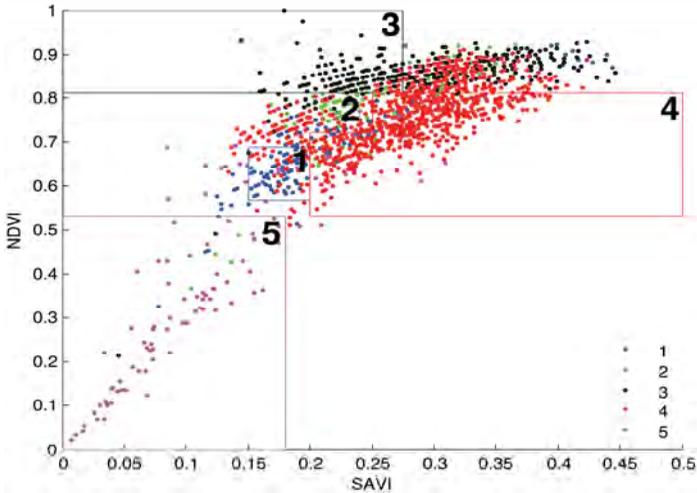


Fig. 3: NDVI vs. SAVI plotted for all 5 classes of test pixels. The coloured boxes represent the thresholds used in the first classification step.

In a second step, these thresholds were applied to the 2001 SAVI and NDVI data. The pixels, which could not be assigned to a class with sufficient accuracy so far, were in a third step classified with both maximum likelihood and minimum distance methods (bands 2,5,7). In a preliminary study, this band combination yielded the best class separability for the test polygons. The test polygons were used as trainingsites for the supervised classification.

To minimise the mixed pixel effect we applied sieve filters with thresholds of 3 and 5 pixel to the classified land cover data. The effects of altitude on vegetation zonation have been thoroughly investigated in the study area (e.g. BUSSMANN, 2006). Elevations of >2800 m are dominated by Andean highland vegetation (páramo) and were defined as such by means of a DTM. The accuracy of the algorithm was assessed by comparing the classification results with the land cover of the validation polygons.

The classification of the other Landsat data is based on the processing of the 2001 ETM+ scene. To account for the change of sensor, we recomputed the vegetation indices (VI) derived from TM and MSS scenes with linear correlation functions published by Steven et al. (2003):

$$VI(EMT+) = -0.001 + 1.021 * VI(TM) \quad (\text{eq. 1})$$

$$VI(ETM+) = -0.023 + 1.074 * VI(MSS) \quad (\text{eq. 2})$$

Then, the first step of classification was performed using the VI thresholds extracted from the 2001 procedure. Supervised classification was realised with signatures obtained from the trainingsites of the 2001 scene.

post classification comparison

A pixel-by-pixel comparison of a pair of land cover maps shows at which places the classification of Landsat scenes of two different dates yielded different results. Whether the detected changes are plausible or not is checked against the atmospherically and topographically corrected satellite scenes.

3 Results

The percentage of pixels assigned to classes in the first classification step accounts for 59.4% of the 2001 test pixels. The accuracy of this part of the classification is > 80 % for the classes forest, pasture-like vegetation and sparse vegetation (cf. Tab. 4). The spectral signature of the reforestation and shrubbery class overlaps with other land cover classes (cf. Fig. 3) and therefore yields the lowest accuracy (51.7 %).

Tab. 4: accuracy in first step of classification

code	land cover	accuracy
1	bracken + small bushes	64.9%
2	reforestation site + shrubbery	51.7%
3	forest + secondary forest + wood pasture	82.2%
4	pasture (with trees) + páramo + ridge vegetation	89.0%
5	sparse vegetation (landslides, roads, riverbed)	84.9%

By applying these thresholds to the 2001 vegetation index data 62.2 % of image is classified. After replacing the remaining image pixel with the results of supervised classification and application of sieve filters, the results were validated: a combination of vegetation index thresholding, maximum likelihood classification and 5 pixel sieve filter yielded the highest overall accuracy (Tab. 5).

Tab. 5: accuracy of classification methods for single land cover classes determined by cross validation of the 2001 ETM+ scene

classification	sieve	1	2	3	4	5	overall accuracy
ML257	no	20.4	29.3	58.1	70.9	87.5	68.8
ML257	3	18.3	25.9	88.0	71.5	87.5	69.8
ML257	5	17.2	20.4	91.5	71.2	87.5	70.7
MD257	no	8.6	22.4	70.6	75.2	87.5	62.6
MD257	3	4.3	22.4	74.1	76.8	87.5	64.1
MD257	5	0.0	22.4	77.0	77.2	87.5	65.0

The changes detected by pixelwise comparison of two classified scenes seem to be reasonable. A visual validation of the change detection map shows for example that areas covered by forest in both scenes are correctly identified as “unchanged” (i.e. points 2 and 4 in Fig. 4). Deforestation

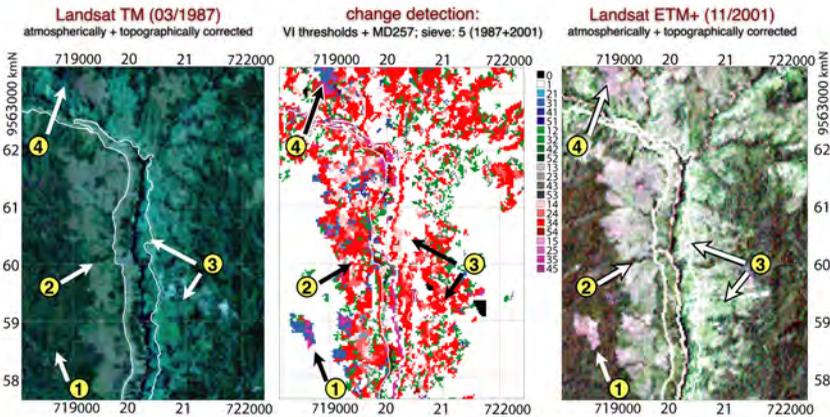


Fig. 4: visual accuracy check of changes detected in a subset of the study area between Landsat scenes of 1987 and 2001 (RGB: bands 1,2,3). White: no change detected, black: cloud mask, direction of change coded (first digit: class in 1987, second digit: class in 2001). Encircled numbers indicate particularities of the change detection (see text).

sites are also successfully detected (point 1 in Fig. 4). Problematic is, that some pasture sites are misclassified as forest in the older scene. These sites will be detected as “deforested” (i.e. point 3 in Fig. 4). This effect is less pronounced in the combination of vegetation index thresholding and minimum distance classification compared to the combination of vegetation index thresholding and maximum likelihood classification.

4 Discussion

The three land cover types “forest”, “pasture”, and “sparse vegetation” could be distinguished by a combination of vegetation index thresholding and supervised classification and subsequent sieve filtering with very high accuracy. While maximum likelihood classification yielded the best results in the validation process of the 2001 ETM+ scene, minimum distance method seems to be superior in the whole change detection procedure. Information extracted from the most recent scene could be used for the classification of older scenes, with plausible results.

One deficiency in the whole change detection approach is, that some pasture or succession areas in the older scenes are misclassified as forest. This is probably due to the occurrence of clouds in all but the most recent Landsat scene, which leads to a coarser spectral resolution in the detection of surface reflectance compared to cloud free scenes. After some upgrading it can be used for reliably quantifying deforestation at relatively high resolution. Even at this stage we are able to provide an overview of spatial distribution of the most important land cover types and their change over time. This is a huge benefit for the research community because no such comprehensive synopsis of land use exists to date. Mapping several hundred square kilometres of such an inaccessible area with only ground-based information is simply an infeasible task.

5 Conclusion

We were able to develop a useful tool to map major changes - such as deforestation - in the land cover within a tropical mountain rainforest environment. The change detection based on remotely sensed data developed in this study is of particular importance when the area of interest has a limited accessibility and when little ground truth of past situations is available. Research in the next future will focus on improving the change detection algorithm to exclude misdetection of deforestation. A cost-effective map of the most dominant land cover classes is a byproduct of this study and –as an inventory - complements other ongoing research in the area. Future work on land cover should include radar applications because microwaves are not disturbed by the abundant cloud cover in the tropics. This would guarantee frequent information of *the whole* area of interest. Moreover it must be checked whether other multispectral sensors can serve as suitable replacements for the damaged Landsat ETM+.

6 References

- BRUMMITT, N. & LUGHADHA, E. N., 2003: Biodiversity: Where's Hot and Where's Not. *Conservation Biology*, **17** (5): 1442-1448.
- BUSSMANN, R. W., 2006: La diversidad florística andina y su importancia por la diversidad cultural –ejemplos del Norte de Perú y Sur de Ecuador (Andean floristic diversity and its importance for cultural diversity - examples from Northern Peru and Southern Ecuador). *Lyonia* **10** (2). <http://www.lyonia.org/viewArticle.php?articleID=391>
- FAO, 2005: State of the world's forests. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. ISBN: 92-5-105187-9. Also available at: www.fao.org/forestry/site/21407/en
- HUETE, A.R., 1988: A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing Environ*, **25**: 295-309.
- RICHTER, R., 1996: A spatially adaptive fast atmospheric correction algorithm. *Int. J. Remote Sensing*, **17**: 1201-1214.
- RICHTER, R., 1998: Correction of satellite imagery over mountainous terrain. *Applied Optics*, **37**: 4004-4015.
- ROUSE, J. W. & HAAS, R. H., SCHELL, J. A., DEERING, D. W., 1973: Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I: 309-317.
- SOURIS, M., 2002: República del Ecuador : modelo numérico del relieve, escala 1:2500000, Modèle numérique calculé à partir des cartes topographiques de l'IGM (1:50000, 1:100000), édité et distribuée par l'IGM, Quito. Also available at: <http://rslultra.star.ait.ac.th/~souris/ecuador.htm>

Untersuchung der Abhängigkeit der Landnutzung von verschiedenen Standortparametern im Osterzgebirge mittels Fernerkundung und Statistik

SABINE HÖHLIG¹, RICHARD GLOAGUEN², IRMGARD NIEMEYER³ & HERMAN HEILMEIER⁴

Zusammenfassung: In dieser Arbeit stellen wir eine Möglichkeit vor, Standortparameter mit Fernerkundungsmethoden und konventioneller Kartierung zu quantifizieren. Wir modellierten die Landnutzung in Abhängigkeit von abiotischen Faktoren in einem Teileinzugsgebiet der Wilden Weißeritz. Die Parameter Boden und Geologie konnten dabei digitalen Karten entnommen werden. Ein digitales Oberflächenmodell wurde über photogrammetrische Auswertungen von Stereobildpaaren ermittelt. Wir erhielten eine Auflösung von 4,2 m. Höhen, Hangneigung und Exposition konnten anschließend abgeleitet werden. Die aktuelle Landnutzung wurde mit Hilfe der Minimum-Distance-Methode klassifiziert und mittels Geländebegehungen validiert. Für die Modellierung der Landnutzung wurde eine logistische Regression durchgeführt. In dieser Arbeit wurde dieses Verfahren für vier verschiedene Landnutzungsarten übertragen. Es wurden Bestimmungskoeffizienten von 19 % bis 56 % erreicht werden.

1 Untersuchung der Abhängigkeit der Landnutzung von verschiedenen Standortparametern im Osterzgebirge mittels Fernerkundung und Statistik

Landnutzung wird in Anbetracht des immer größeren Eingreifens der Menschen und klimatischen Änderungen mehr und mehr zu einer bedeutenden Angelegenheit. Diese Arbeit befasst sich mit der Modellierung der Abhängigkeit der Landnutzung von verschiedenen abiotischen Standortparametern. Es sollen hier Möglichkeiten der Quantifizierung einiger dieser Parameter mit Hilfe von Fernerkundungsmethoden und konventioneller Kartierung vorgestellt werden. Die Arbeit ist Teil des BMBF-Projektes **EMTAL** (Einzugsgebietsmanagement von Talsperren im Mittelgebirge) und des DBU-Projektes **HochNatur** (Hochwasser- und Naturschutz). Es wurde in einem Teileinzugsgebiet der Wilden Weißeritz (Weißbach, Sachsen) gearbeitet (Abbildung 1). Als Standortparameter wurden Boden, Geologie, Geländehöhe, Hangneigung und Exposition untersucht. Dabei konnten die Parameter Boden und Geologie vorliegenden Karten direkt entnommen werden. Mit Hilfe von Stereobildpaaren des Landesvermessungsamtes Sachsen wurden über photogrammetrische Auswertungen digitale Höhenmodelle erstellt, um später die Parameter Geländehöhe, Hangneigung und Exposition daraus abzuleiten. Die Landnutzung wurde über eine Klassifizierung eines Satellitenbildes (ASTER) ermittelt und später durch Begehungen im Gelände abgeglichen.

¹ Dipl.-Geoökol. Sabine Höhlig, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie B. von-Cotta-Straße 2, 09599 Freiberg, e-mail: sabine.hoehlig@web.de

² Juniorprof. Dr. Richard Gloaguen, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geologie , B. von-Cotta-Straße 2, 09599 Freiberg, e-mail: gloaguen@geo.tu-freiberg.de

³ Juniorprof. Dr. Irmgard Niemeyer, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Markscheidewesen und Geodäsie, Reiche Zeche, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, e-mail: Irmgard.Niemeyer@tu-freiberg.de

⁴ PD Dr. rer. nat. habil. Hermann Heilmeier, TU Bergakademie Freiberg, Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum (IÖZ), Institute für Biowissenschaften, AG Biologie / Ökologie, Leipziger Straße 29, 09599 Freiberg, e-mail: Hermann.Heilmeier@ioez.tu-freiberg.de

Nachdem alle notwendigen Daten zusammengetragen wurden, konnte die Landnutzung mittels logistischer Regression modelliert werden. Im Folgenden sollen nun abschnittsweise die Erstellung des Geländemodells, die Landnutzungsklassifizierung und die Modellierung der Landnutzung näher betrachtet werden.

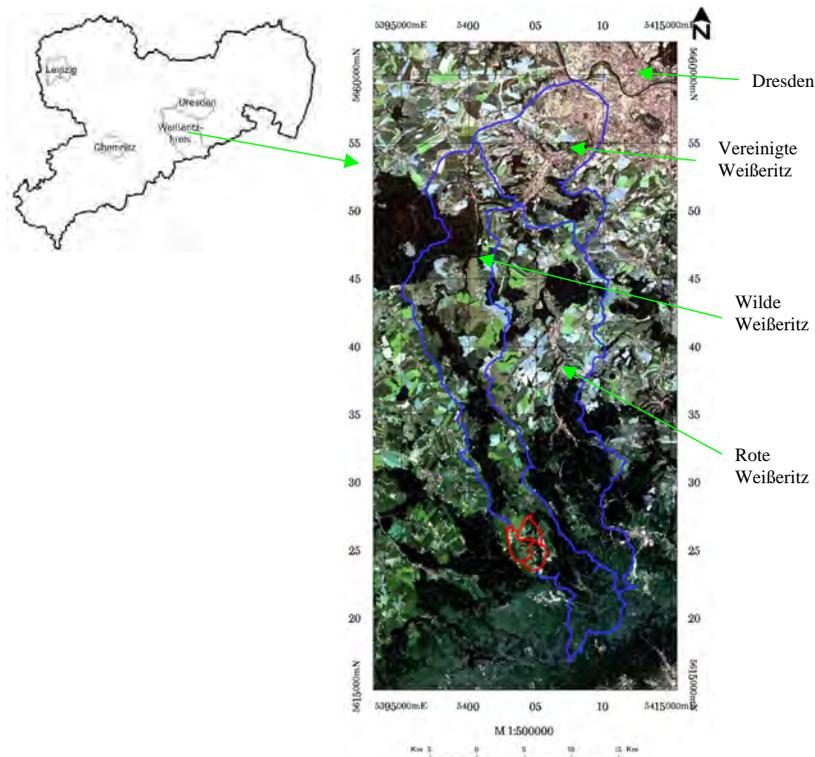


Abb. 1: Übersicht über das Untersuchungsgebiet (blau- gesamtes Einzugsgebiet der Weißeritzen, rot – Einzugsgebiet des Weißbaches; Grundlage ist eine Landsat-Aufnahme)

2 Erstellung eines Digitalen Geländemodells

Ein digitales Höhenmodell (DHM) enthält digital gespeicherte Höhenpunkte einer bestimmten Oberfläche (z.B. der Erdoberfläche, der Gewässeroberfläche). Zu unterscheiden ist dabei das digitale Geländemodell (DGM), welches die Höheninformationen der natürlichen Geländemorphologie wiedergibt, während ein digitales Oberflächenmodell (DOM) auch Erhebungen wie Bebauung und Vegetation enthält. Mit Hilfe verschiedener Softwarelösungen ist es möglich, aus Luftbildern digitale Oberflächenmodelle zu erzeugen. In der vorliegenden Arbeit erfolgte die Berechnung von DOM und DGM mit dem in PCI Geomatica/OrthoEngine enthaltenen Algorithmus für das Gebiet des Weißbaches.

2.1 Datengrundlage und methodische Grundlagen

Als Datengrundlage für das Weißbacheinzugsgebiet dienten neun schwarz-weiße Luftbildaufnahmen des Landesvermessungsamtes Sachsen (LVA) im Maßstab 1:16.000 und einer Bodenauflösung von ca. 40 cm. Die Längsüberdeckung in Flugrichtung beträgt ca. 60% und die Querüberdeckung der Flugstreifen ca. 24%. Die Bilder standen als digitalisierte Rasterdaten im tiff-Format zur Verfügung. Außerdem wurden Passpunkte vom Landesvermessungsamt und selbst per GPS (GARMIN eTrax Vista GPS und Trimble GPS Pathfinder XR) eingemessene Passpunkte verwendet.

Wie bei jeder photogrammetrischen Auswertung werden auch für die Ableitung von Höheninformationen die Beziehungen zwischen dem kamerafesten Aufnahmesystem und den Pixeln der dazu gehörigen Luftbild- oder Satellitenaufnahme sowie den entsprechenden Objektpunkten auf der Erdoberfläche mit Hilfe von mathematischen Modellen berechnet. Dazu wird zunächst ein Bildkoordinatensystem mit Hilfe der sog. *inneren Orientierung* definiert. Die sog. *äußere Orientierung* beschreibt die Lage und Ausrichtung des räumlichen Bildkoordinatensystems im übergeordneten Objektkoordinatensystem des betreffenden Geländes. Sie lässt sich indirekt mit Hilfe sog. Passpunkte (engl. Ground Control Points, GCPs) berechnen. Werden mehrere Bilder verwendet, so werden zusätzlich sog. Verknüpfungspunkte (engl. Tie Points, TPs) benötigt. Als korrespondierende (homologe) Punkte kennzeichnen sie Positionen bzw. Objekte, die in zwei (oder mehr) Bildern eindeutig identifiziert werden können, und dienen der geometrischen Verknüpfung der einzelnen Luftbilder.

Auf Grundlage der Kalibrierungsdaten der Kamera, der Pass- und Verknüpfungspunkte kann mit Verfahren der Bündelblockausgleichung gearbeitet werden. Dabei werden die Strahlenbündel der einzelnen Bilder so zusammengesetzt, dass die geringsten Abweichungen der Strahlen zu den GCPs bzw. TPs entstehen (näheres siehe KRAUS, 1997).

Da mit dieser Methodik digitale Oberflächenmodelle entstehen, wurden die entsprechenden Gebiete mit Vegetation und Bebauung mit Höhenwerten eines vorhandenen Geländemodells (20 m Auflösung; LVA) versehen.

2.2 Ergebnis

Die Erzeugung des digitalen Oberflächenmodells erfolgte mit 138 Passpunkten und 54 Verknüpfungspunkten. Der mittlere Fehler der Passpunkte beträgt 0,18 m in x-Richtung und 0,17 m in y-Richtung, für die Verknüpfungspunkte ergab sich ein mittlerer Fehler von weniger als 0,01 m sowohl in x- als auch in y-Richtung. Es ergab sich ein digitales Oberflächenmodell mit einer Auflösung von 4,2 m (siehe Abbildung 2). Bei den schwarzen Bereichen handelt es sich um Fehlwerte, d.h. an diesen Stellen konnten keine korrespondierenden Pixel gefunden werden. Diese Gebiete repräsentieren Felder mit recht einheitlichen Grauwertverteilungen, die es erschweren gleiche Positionen genau zu lokalisieren. Diesen Bereichen wurden (wie schon für Gebiete mit Bebauung und Vegetation erwähnt) Werte eines vorhandenen Geländemodells des LVA (Auflösung 20 m) zugewiesen. In Abbildung 3 ist das resultierende Geländemodell dargestellt.

Um die Güte des erstellten Geländemodells zu ermitteln, wurden im Gelände im südlichen Teil des Einzugsgebietes einige Profile mittels GPS genommen. Diese konnten dann sowohl mit dem erstellten Geländemodell (Auflösung: 4,2 m) als auch mit dem schon vorhandenen Geländemodell (Auflösung: 20 m) verglichen werden. Die GPS-Messungen im Gelände bestätigen das erstellte Modell.

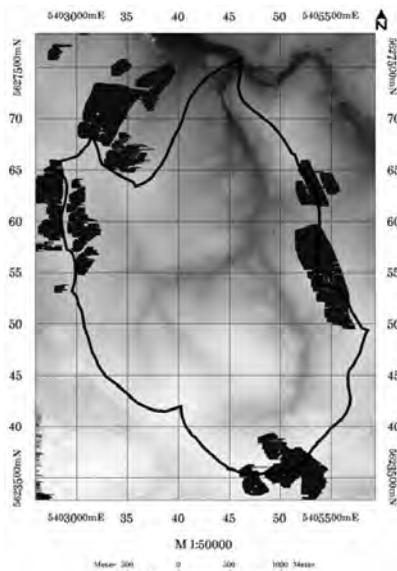


Abb. 2: Digitales Oberflächenmodell des Weißbacheinzugsgebietes (schwarze Linie; je heller der Grauwert, desto höher)

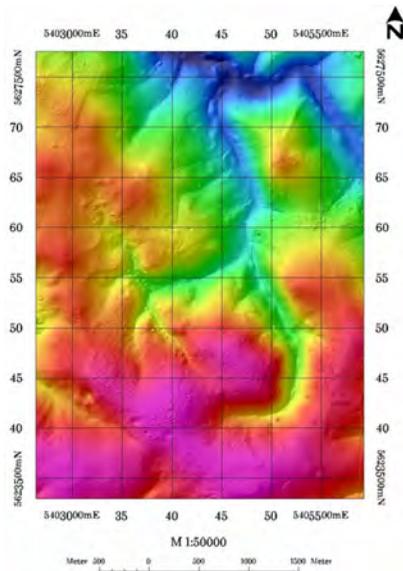


Abb. 3: Digitales Geländemodell hinterlegt mit einem Schattenrelief (von blau über grün, gelb und rot bis violett ansteigende Höhen)

3 Landbedeckungsklassifizierung

3.1 Datengrundlage und methodische Grundlagen

Für die Klassifizierung der Landbedeckung wurde eine ASTER-Aufnahme (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Radiation Radiometer) vom 10. September 2004 verwendet.

In dieser Arbeit wurde eine überwachte Klassifizierung durchgeführt. Die wichtigsten und am häufigsten angewendeten Methoden sind dabei das Maximum-Likelihood-Verfahren, das Minimum-Distance-Verfahren und das Quader-Verfahren (näheres siehe ALBERTZ, 2001). Die Trainingsgebiete für die gesuchten Landnutzungsklassen „Wald“, „Acker“, „Grünland“ und „Siedlung“ wurden an Hand vorhandener Kartierungen (BIANCHIN, 2004) und eigenen Geländebegehungen im Juni/Juli 2005 ermittelt. Es ist dabei vorteilhaft Spektralbereiche zu wählen, in denen sich die zu trennenden Objektklassen möglichst stark in ihrer Reflektionscharakteristik unterscheiden (ALBERTZ, 2001).

Die Qualität von Trainingsgebieten lässt sich mittels der statistischen Differenz spektraler Signaturen zweier Kanäle untersuchen. Dafür eignen sich die Bhattacharyya-Distanz und die Transformierte Divergenz. Beide geben Werte zwischen Null (völlige Überlappung der Signaturen zweier Klassen) und Zwei (vollständige Trennung) an.

3.2 Ergebnis

Bei den Klassifizierungen wurde auf die Verwendung der thermalen Infrarotkanäle verzichtet, da sie auf Grund ihrer groben Auflösung von 90 m zu keinen nennenswerten Verbesserungen führten.

Es wurden nur die drei Nutzungstypen „Wald“, „Acker“ (Feld1 und Feld2) und „Grünland“ verwendet. Die Nutzungsklasse „Siedlung“ wurde nicht mit betrachtet, da es auf Grund der geringen Siedlungsdichte zu großen Ungenauigkeiten kam. Diese Gebiete wurden aus Karten extrahiert und für die anschließende Modellierung verwendet. Die Distanzwerte, die die Trennung der Trainingsgebiete angeben, befanden sich stets im Bereich um 1,8 bis 2,0. Eine gute Unterscheidung der Trainingsgebiete ist demnach für die Klassifizierung gegeben.

Auf Basis dieser Trainingsgebiete wurde eine Minimum-Distance-Klassifizierung durchgeführt. Das Resultat ist in Abbildung 5 zu sehen (links).

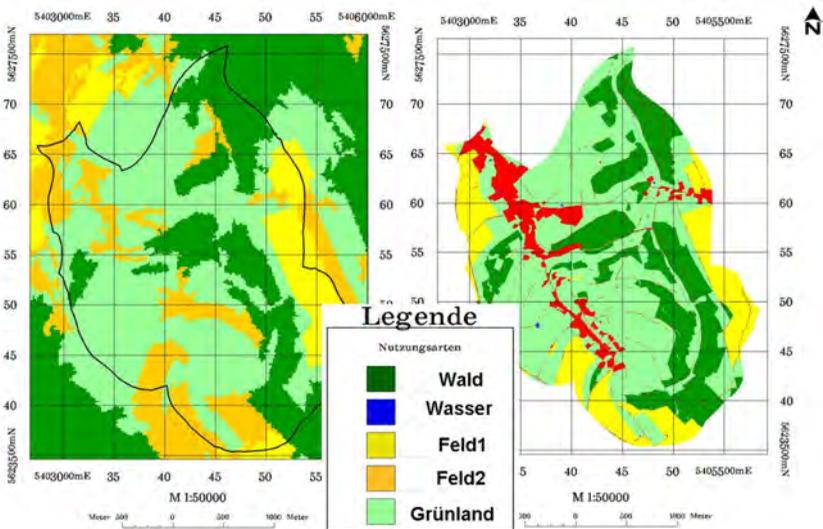


Abb. 5: Links: Ergebnis der Minimum-Distance-Klassifizierung für das Weißbachgebiet; rechts: Landnutzungskartierung nach BIANCHIN, 2004 und eigenen Begehungen 2005

Zum Vergleich ist ebenfalls in Abbildung 5 (rechts) die Landnutzung aus der Kartierung (S. BIANCHIN, 2004) und den eigenen Begehungen von 2005 dargestellt.

Es gibt eine große Übereinstimmung zwischen Klassifikation und Karte. Lediglich einige Gebiete werden als Feld klassifiziert, obwohl sie im Vergleich zur Kartierung der Klasse Grünland angehören würden. Dies kommt dadurch, dass diese zu einem anderen Zeitpunkt aufgenommen wurde als das Satellitenbild. Beide Aufnahmen sind Momentaufnahmen. Die Unterschiede sind durchaus nicht als Fehler der Klassifikation zu werten.

4 Modellierung der Landnutzung

4.1 Datengrundlage und methodische Grundlagen

Für die Modellierung wurde eine logistische Regression durchgeführt. In das Modell soll als *abhängige* Variable die **Landnutzung** eingehen. Es sollten lediglich die Nutzungsarten Grünland, Acker, Wald und Siedlung verwendet werden. Diese kann man der Klassifikation entnehmen. Als *unabhängige* Variable sollen in das Modell Boden, Geologie, Höhe, Exposition und Hangneigung eingehen. Die Informationen über **Bodentypen** konnten dabei der Konzeptbodenkarte des LfUG entnommen werden. Die **geologischen Daten** wurden in Form der digitalisierten geologischen Karte von Sachsen ebenfalls durch das LfUG zur Verfügung gestellt. Das selbst erzeugte digitale Geländemodell (DGM, Auflösung 4,2 m) und das vorhandene Geländemodell des LVA (20 m Auflösung) stellen die **Höhenangaben** bereit. Die benötigte **Exposition** und die **Hangneigung** wurden aus den Geländemodellen abgeleitet. Alle notwendigen Daten wurden mit einem Punktanstand von 50 m bzw. 100 m abgegriffen. Die angewendete logistische Regression ist das am häufigsten verwendete Verfahren in der Habitatmodellierung zur Modellierung von Präsenz(1)- und Absenz(0)-Daten (DORMAN et al., 2004). Sie stellt einen Spezialfall der verallgemeinerten linearen Modelle dar. Dabei werden die Prädiktoren zu einem linearen Prädiktor (LP bzw. η) zusammengefasst und zum Erwartungswert $\mu = E(Y)$ der Response-Variablen Y durch eine *link*-Funktion $g()$ in Beziehung gesetzt (GUISAN et al., 2002; SCHMID, 2002). Die Regressionskoeffizienten müssen zunächst geschätzt werden. Die Schätzung erfolgt mittels des Maximum-Likelihood-Verfahrens (ML). Dabei wird eine Likelihood-Funktion aufgestellt, welche die Wahrscheinlichkeit der beobachteten Daten als eine Funktion der zu schätzenden Regressionskoeffizienten ausdrückt. Die Koeffizienten werden dabei so geschätzt, dass die Wahrscheinlichkeit, bei gegebenem Modell die empirischen Daten zu beobachten, maximiert wird. Multipliziert man die Prädiktoren mit den jeweiligen – bereits geschätzten – Regressionskoeffizienten, erhält man den linearen Prädiktor. Mit der invertierten *link*-Funktion erhält man Werte im Bereich der Skala der originalen Response-Variablen. Als Linkfunktion wird bei der logistischen Regression der *logit* verwendet. Die inverse logistische Transformation des *logit* lautet wie folgt:

$$p(y) = \text{Nutzungsart}(1/0) = \frac{e^{\eta}}{1 + e^{\eta}} \quad (1)$$

Durch den linearen Zusammenhang des Prädiktors η ergibt sich eine sigmoidale Responsekurve. Man erhält so Werte zwischen 0 und 1, welche als Vorkommenswahrscheinlichkeit interpretiert werden können. Ein Vorteil der verallgemeinerten linearen Modelle ist, dass sie ermöglichen, die Vorhersagen adäquat zu begrenzen (DORMAN et al., 2004).

4.2 Ergebnis

Für die Modellqualität wurde das Bestimmtheitsmaß R^2 verwendet. Diese Werte sind in der Abbildung 6 für das Weißbachgebiet zusammengestellt. Dort sind die Anteile der einzelnen Standortparameter an der erklärten Varianz zu sehen. Auf Grund von Korrelationen zwischen Hangneigung und Höhe wurde eine der beiden Eingangsvariablen nicht in die Modellerstellung mit einbezogen. Hier wurde sich für den Ausschluss der Höhe entschieden, da Hangneigung wahrscheinlich den größeren Einfluss auf die Nutzung hat.

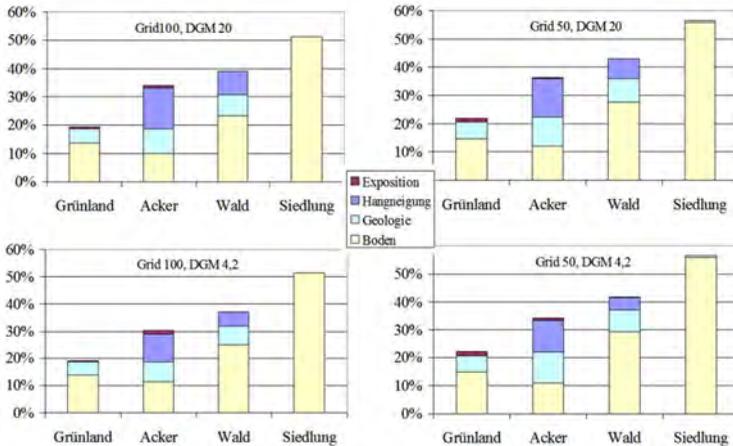


Abb. 6: Anteile der Varianz der einzelnen Standortparameter

Es konnten demnach 19 % bis 56 % der Varianz erklärt werden, wobei der Bodentyp dabei den größten Anteil stellt.

Das Modell wurde für ein benachbartes Gebiet validiert. Dazu mussten die Parameter Boden und Geologie so zusammengefasst werden, dass in beiden Gebieten die gleichen Einheiten vorhanden waren. Deshalb musste anschließend ein neues Modell mit den vereinfachten Einheiten erstellt werden. Dieses wies eine etwas geringere Modellqualität auf, was mit dem Informationsverlust durch Zusammenfassung von Boden- bzw. Geologieeinheiten zu begründen ist.

5 Diskussion und Ausblick

Für Luftbilder mit einem Maßstab von 1: 10000, die mit einer Kleinbild-Kamera mit der Brennweite von 50 mm aufgenommen wird, geben HENRY et. al. (2002) eine erreichbare Genauigkeit in x-, y- und z-Richtung von 0,5 bis 3 m an. In der vorliegenden Arbeit wurden allerdings Fotos mit einem kleineren Maßstab (1: 16000) verwendet, die verwendete Kamera hatte eine Brennweite von 152 mm. Unter diesen Voraussetzungen liegt die hier erreichte Genauigkeit von 4,2 m in x- und y-Richtung in einem guten Bereich. In z-Richtung ist eine exakte Aussage über die Genauigkeit nicht direkt möglich. Beim Vergleich mit dem 20 m DGM des LVA kann man aber von einer metrischen Genauigkeit ausgehen (Differenz der Höhen des 20 m DGM's und des 4,2 m DGM's: mittlere Differenz -1,9 m; Standardabweichung ~ 2 m; entspricht einer externen Validierung - KASSER & EGGLE, 2002).

Die Luftbilder wurden zu einem Zeitpunkt aufgenommen, zu dem die Sonne niedrig stand. Dadurch enthielten die Luftbilder v. a. in Bereichen von Wäldern Schatten, welche ebenfalls die Qualität des erstellten Geländemodells beeinflussen.

Die Landnutzungsklassifizierung mittels Satellitenbildern stellt eine häufig angewendete Methode dar. Für Sachsen gibt es allerdings kaum publizierte Daten über Landnutzungsuntersuchungen mittels Fernerkundungsdaten. Aufgrund des relativ dünn besiedelten Untersuchungsgebietes und der maximalen räumlichen Auflösung der verwendeten Bilddaten von 15 m war es schwierig, Siedlungsflächen zu identifizieren. Dadurch entstehen Mischpixel, die kaum richtig klassifiziert werden. Dieses Problem tritt häufiger auf (siehe z. B. LAUSCH &

BIEDERMANN, 2000). Unterschiede im Vergleich zur Kartierung ergaben sich durch die unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkte. Die Satellitendaten wurden im September 2004 aufgenommen, die Biotoptypenkarte (BIANCHIN, 2004) wurde Anfang 2004 erstellt und die Begehungen wurden Mitte 2005 durchgeführt. Da die Landnutzung aber dynamisch abläuft, d. h. es kommt von Jahr zu Jahr zu Umnutzungen v. a. im Ackerbau, können die meisten Abweichungen darauf zurückgeführt werden. Die Abgrenzungen der einzelnen Flächen bleiben aber meist gleich. Auch innerhalb eines Jahres ändern sich die Bedingungen am Boden, was die reflektierten Spektren der einzelnen Nutzungsarten stark beeinflusst. Die Probleme in Zusammenhang mit den Siedlungsflächen können möglicherweise mit Hilfe einer objektorientierten Klassifizierung behoben werden. Durch die vorherige Segmentierung des Untersuchungsgebietes und die anschließende Klassifizierung auf Grundlage der Segmente können Probleme wie Mischpixel behoben werden. Außerdem können so auch segmentbezogene Eigenschaften wie Formmerkmale mitbetrachtet werden.

Das Verfahren der Landnutzungsmodellierung wurde in dieser Arbeit mit zum ersten Mal auf vier verschiedene Landnutzungsarten übertragen. Die erhaltenen Modellqualitäten von 19 % bis 56 % sind in der Biologie durchaus vertretbare Resultate. Auch die Übertragung auf ein Nachbargebiet brachte ähnliche Qualitäten hervor.

Um die Effektivität der Modellierung noch weiter zu verbessern, sollen in weiteren Arbeiten nicht-lineare Abhängigkeiten der Landnutzung und der Standortparameter untersucht werden. Dieser Ansatz verspricht Erfolg vor allem in Gebieten, für die Daten nur spärlich zur Verfügung stehen und der Erwerb dieser Daten schwierig ist (z. B. Entwicklungsländer).

6 Literaturverzeichnis

- ALBERTZ, J., 2001: Einführung in die Fernerkundung – Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern, 2. Aufl., 249 S., Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt
- BIANCHIN, S., 2004: Biotoptypenkartierung im Weißbachtal im Rahmen des HochNatur-Projektes, unveröffentlichtes Manuskript, TU Bergakademie Freiberg
- DORMANN, C. F.; BLASCHKE, T.; LAUSCH, A.; SCHRÖDER, B. & SÖNDEGERATH, D., 2004: Habitatmodelle – Methodik, Anwendung, Nutzen. Tagungsband zum Workshop vom 8. – 10. Oktober 2003 am UFZ Leipzig, UFZ-Berichte 9/2004
- GUISAN, A.; EDWARDS, T.C.; J. & HASTIE, T. (2002): Generalized linear and generalized additive models in studies of species distribution: setting the scene, *Ecological Modelling* 157: 89–100
- HENRY, J.-B.; MALET, J.-P., MAQUAIRE, O. & GRUSSENMEYER, P., 2002: The use of small-format and low-altitude aerial photos for realization of high-resolution DEMs in mountainous areas: application to the Super-Sauze Earthflow (Alpes-de-haute-provence, France), *Earth Surface Processes and Landforms* 27: 1339 – 1350
- KASSER, M. & EGELS, Y., 2002: Digital Photogrammetry, Taylor & Francis London, 350 S.
- KRAUS, K., 1997: Photogrammetrie – Band 1: Grundlagen und Standardverfahren, 6. Aufl., 394 S., Ferd. Dümmlers Verlag Bonn
- LAUSCH, A. & BIEDERMANN, F. (2000): Analysis of temporal changes in the Lignite Mining Region south of Leipzig using GIS and landscape metrics. – in: CLARE, T. & HOWARD, D. (eds.) *Quantitative approaches to landscape ecology*, 6. – 10. September, Bangor, IA (UK), S. 71 - 83

Ein hybrider Verfahrensansatz zur Versiegelungskartierung

BIRGIT KLEINSCHMIT¹, BODO COENRADIE², PATRICK HOSTERT³, LEILAH. HAAG¹

Zusammenfassung: Mit dem Ziel, mittelfristig eine stadtweit homogene, aktuelle und hinreichend genaue Datengrundlage zur Erfassung und Veränderung von Versiegelung zu nutzen, wurde für die Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung im Rahmen einer Konzeptstudie ein Kartierungsverfahren entwickelt, welches sowohl Satellitenbilddaten als auch terrestrische Geo-Daten einbezieht. Der Beitrag stellt Methode und Ergebnisse des hybriden Verfahrensansatzes für ein operationelles, reproduzierbares, transparentes und kostengünstiges Verfahren zur Versiegelungskartierung dar. Es beruht auf der Analyse von hoch auflösenden multispektralen Spot5 Satellitenbilddaten. Im Klassifizierungsprozess werden Fachinformationen des Informationssystems Stadt und Umwelt (ISU) sowie ALK-Daten eingebunden. Der Ableitung des aggregierten Versiegelungsgrades auf Blockebene geht eine spektrale Klassifikation unter Einbeziehung des NDVI sowie eine wissensbasierte Klassifizierung voraus. Genauigkeitsabschätzungen zeigen, dass das Verfahren nach Anpassungen zur Übertragbarkeit auf gesamtstädtischer Ebene geeignet ist.

1 Einleitung

Die Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung besagt, dass der Flächenverbrauch in Deutschland von heute 93 ha bis zum Jahre 2020 auf 30 ha pro Tag zu reduzieren ist. Der aktuelle Versiegelungsgrad ist damit eine zentrale Kenngröße für alle Städte und Gemeinden in Deutschland. Stadtverwaltungen setzen die Daten schwerpunktmäßig im Bereich Modellbildung (Stadtklima, Wasserhaushalt) oder für Bewertungsverfahren (Bodenschutz) ein. Im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit kommt auch der Dokumentation des Zustandes und der Beeinträchtigung von Natur und Landschaft durch Versiegelung eine wichtige Bedeutung zu. Nicht zuletzt wird im politischen Raum zunehmend nach zeitlich hoch aufgelösten Versiegelungsdaten verlangt, um im Rahmen eines Monitorings den Erfolg umweltpolitischer oder stadtplanerischer Strategien messen zu können.

In der Berliner Senatverwaltung für Stadtentwicklung (SenStadt) liegen zurzeit neben Auswertungen für Teilgebiete mehrere Datenbestände zur Versiegelung vor. Es handelt sich um die Versiegelungsdaten des Digitalen Umweltatlas Berlin (SENSTADT 2004), der Berliner Wasserbetriebe (BWB) und einer Satellitenbilddatenauswertung von SPOT4- und LANDSAT7-Szenen (ROESRATH & KITTELBERGER 2001).

Die Datenbestände und die Ergebnisse der jeweiligen Kartierungen wurden einem Vergleich der jeweils methodisch bedingten Unterschiede unterzogen. Die Analysen verdeutlichen, dass die unterschiedlichen Ansätze sehr heterogene Ergebnisse liefern. Die Stärken und Schwächen der Kartierungsansätze variieren innerhalb des Stadtgebietes dementsprechend sehr stark (HAAG 2006).

¹ Prof. D. Birgit Kleinschmit & Dipl. Ing. Leilah Haag, TU Berlin, Fak. VI, Institut für Landschaftsarchitektur und Umweltplanung, Straße des 17. Juni 145, D-10623 Berlin, email: birgit.kleinschmit@tu-berlin.de & haagl@web.de

² Dr. Ing. Bodo Coenradie, Digitale Dienste Berlin, Lilienthalstraße 22, D-10965 Berlin, email: bodo_coenradie@web.de

³ Prof. Dr. Patrick Hostert, Abteilung Geomatik, Geographisches Institut, HU Berlin, Unter den Linden 6, D-10099 Berlin, email: patrick.hostert@geo.hu-berlin.de

Fehlende Aktualität und Verfügbarkeit, unbefriedigende Qualität der bestehenden Versiegelungsdaten sowie die zwischenzeitliche Verfügbarkeit zusätzlicher Geobasis- und Geofachdaten (bis zu einem Maßstab 1: 5.000) veranlassten die Senatsverwaltung zur Neukonzeption eines Verfahrens zur Erstellung eines flächigen und einheitlichen Datenbestandes „Versiegelung“ aus unterschiedlichen Datenquellen für Berlin. Auf der Basis von Satellitenfernerkundungsdaten wurde im Rahmen einer Konzeptstudie ein operationelles, nachvollziehbares und reproduzierbares Auswertungsverfahren entwickelt, welches vorhandene Geo-Daten einbezieht (KLENSCHMIT et al. 2006). Im Mittelpunkt der Untersuchungen stand somit die Konzeption eines hybriden Verfahrenansatzes. Mit einer praktikablen und kosteneffizienten Vorgehensweise sollten Kartierungsergebnisse erreicht werden, die den aktuellen Anforderungen der Senatsverwaltung genügen. Hierbei wurde ein möglichst hoher Automatisierungsgrad angestrebt. Die methodische Vorgehensweise wurde an einem Testgebiet in Berlin Charlottenburg (37,6 km²) entwickelt, welches nahezu alle Stadtstrukturtypen beinhaltet, so dass eine Übertragbarkeit auf das gesamte Stadtgebiet möglich ist.

2 Auswahl und Aufbereitung von Geobasis- und Geofachdaten

Für die Aufbereitung und Auswertung der Satellitenbilddaten werden ausschließlich solche Fachinformationen bzw. Geo-Daten genutzt, welche der SenStadt landesweit und flächendeckend zur Verfügung stehen.

Die Struktur des „Regionalen Bezugssystems“ (RBS) des statistischen Landesamtes Berlin definiert statistische Blöcke und deren Codierung (Schlüssel). Sie werden in dem lagetreuen Informationssystem Stadt und Umwelt (ISU) vorgehalten. Die Erfassungsuntergrenze für alle Blöcke liegt bei 500 m². Zu jedem Block der ISU 5-Struktur gibt es einen 16stelligen Schlüssel, der neben Flächeninhalt auch Informationen zur Nutzung beinhaltet (Abbildung 1).



Abb. 1: Blockstruktur - Thema „Strukturtypen“ (aus Digitaler Umweltatlas Berlin, Karte Strukturtypen 06.07; Weiß: kein Block) Quelle: SENSTADT 2005a

Die SenStadt unterscheidet 30 verschiedene Nutzungen, bestehend aus Baulicher Nutzung (WOZ) und Grünnutzung (GRZ) sowie Flächentypen (TYP), die vor allem die baulichen Nutzungen nochmals untergliedern (SENSTADT 2005a). Die Blockstruktur dient in der Studie als Bezugsfläche, auf deren Ebene der Versiegelungsgrad bestimmt wird. Flächen außerhalb der statistischen Blöcke (z. B. Verkehrswege, Gewässer) werden nicht analysiert. Die Sachdaten des ISU dienen der Stratifizierung des Stadtgebietes und fließen in die regelbasierte Klassifizierung ein.

Als Geobasisdaten konnte im Rahmen der Studie auf Sach- und Geometriedaten des Berliner Automatisierten Liegenschaftskataster (ALK, Stand Juli 2004) zugegriffen werden (SEN-

STADT 2005b). Ferner wurden digitale Echtfarben-Orthophotos aus dem Sommer 2004 zur Geokodierung, zu Referenzzwecken sowie zur Genauigkeitsabschätzung der Auswertungsergebnisse herangezogen.

3 Auswahl und Aufbereitung der Satellitendaten

Bei der Auswahl eines geeigneten Satellitenbildsensors wurden die Kriterien „Kartiermaßstab“, „Szenabdeckung“, „Verfügbarkeit“, „operationelle Auswertungsmethode“ sowie „Kosten“ berücksichtigt. Nach Abwägung verschiedener Aufnahmesysteme wurde eine multispektrale SPOT5 Szene vom 6. September 2005 ausgewählt und als systemkorrigierter Datensatz bezogen. Es handelt sich um eine wolkenfreie Aufnahme. Der Schwenkwinkel beträgt ca. 1,9°. Verkippungen von Gebäuden sind vernachlässigbar gering, sodass im Rahmen der Konzeptstudie eine „Ideal“-Szene genutzt werden konnte.

Die Passpunktdefinition im Rahmen der **geometrischen Korrektur** der SPOT5-Daten wurde anhand der zur Verfügung stehenden Orthophotos durchgeführt und der Datensatz anschließend mittels „Nearest Neighbour“ (NN) resampled. Im Mittel wurde eine Lagegenauigkeit von 0,38 Pixel (RMS), bzw. 3,8 m erzielt. Unabhängige Messungen abgebildeter Objekte in Luftbildern sowie Überlagerungen mit den ALK-Daten bestätigten die ausgezeichnete Qualität der geokodierten Daten. Um die methodisch bedingten Treppen-Effekte des NN-Ansatzes im Ausgabebild zu reduzieren, wurde die Pixelgröße auf 5 m x 5 m interpoliert.

Im Rahmen der Konzeptstudie wurde auf **radiometrische Korrekturen** verzichtet, da einerseits die SPOT5-Szene eine sehr geringe atmosphärische Beeinträchtigung aufweist und andererseits keine multitemporalen Vergleiche erfolgen. Für die Anwendung des Kartierungsverfahrens auf gesamt Berlin sind entsprechende Vorverarbeitungen geplant, um im Hinblick auf Vergleichskartierungen die Voraussetzungen zur Übertragbarkeit der Methodik auf andere Szenen und um die Vergleichbarkeit von Ergebnissen zu gewährleisten (HOSTERT et al. 2004).

Der **Normalized Difference Vegetation Index - NDVI** hat sich trotz der bekannten methodischen Defizite in zahlreichen Untersuchungen zur Differenzierung von vegetationsbedeckten und vegetationslosen Oberflächen sowie zur Klassifizierung von Versiegelungsgraden bewährt (KIM & KLEINSCHMIT 2005, NETZBAND 1998). Neben den originalen Spektralkanälen wurde daher der NDVI berechnet und in den Klassifizierungsprozess eingebunden.

4 Methode

Ein wesentliches Kriterium bei der Entwicklung der Methode war die effiziente Nutzung vorhandener Fachinformationen sowie Geo-Daten und deren Verknüpfung mit den Satellitenbilddaten im gesamten Auswertungsprozess. Ferner wurden operationelle pixelbasierte Klassifizierungsverfahren angewendet und miteinander kombiniert, auf objektbasierte Ansätze wurde bewusst verzichtet. Einen Überblick über verschiedene Verfahrensansätze zur Versiegelungskartierung liefern GAMBA & DELL'ACQUA (2004). Das hier verwendete Verfahren gliedert sich in drei Auswertungsstufen (Abbildung 2):

- Kartierung der bebaut versiegelten Fläche,
- Kartierung der unbebaut versiegelten Fläche und
- Ableitung des Versiegelungsgrades.

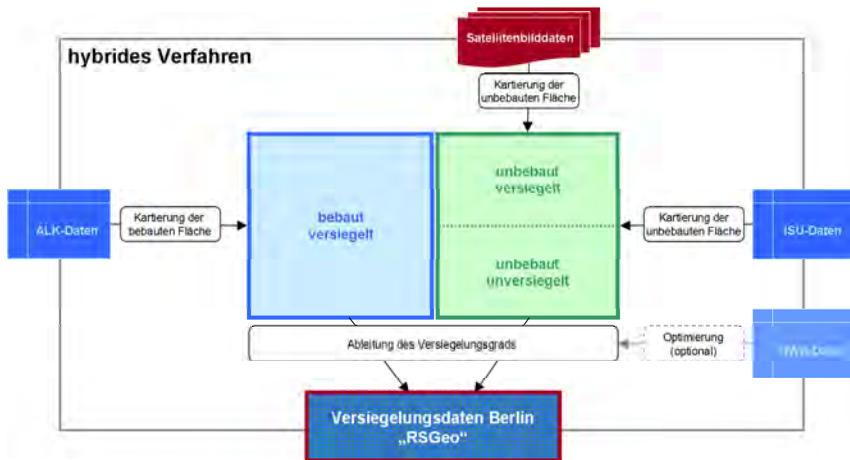


Abb. 2: Schema des hybriden Kartierungsverfahrens

Kartierung der bebaut versiegelten Flächen

Die Abgrenzung der bebaut versiegelten Flächen erfolgte auf der Basis von ALK-Daten (Oberirdische Gebäude). Im Hinblick auf die Kartierungsgenauigkeit der bebaut versiegelten Flächen müssen die bekannten Probleme hinsichtlich der Aktualität von ALK-Daten beachtet werden. Insbesondere Gebäude auf Industrie- und Gewerbeflächen sowie Gartenhäuser in Kleingartengebieten fehlen häufig oder sind nicht vollständig erfasst.

Kartierung der unbebaut versiegelten Fläche

In die Auswertung der unbebauten Flächen werden SPOT5-Daten integriert. Satellitenbildgestützte Versiegelungskartierungen im städtischen Raum erfordern eine auf unterschiedliche Oberflächenbedeckungsarten bzw. Stadtstrukturtypen angepasste Vorgehensweise. Im gesamten Klassifizierungsprozess werden daher zusätzliche Geo-Daten integriert. Insbesondere die Flächentypen des ISU erweisen sich als hilfreich zur Verbesserung der Kartierungsergebnisse. Die Versiegelungskartierung der unbebauten Flächen sieht vier Arbeitsschritte vor.

1. Fernerkundungsrelevante Kategorisierung der Flächentypen (ISU-Daten)

Unter Berücksichtigung bekannter, die Kartierungsgenauigkeit beeinflussende Einflussgrößen wird eine fernerkundungsrelevante Gruppierung der 62 Flächentypen des ISU vorgenommen (SENSTADT 2005c). Zur Ausweisung von 17 Kategorien dienen der mittlere Versiegelungsgrad des Flächentyps nach ISU (gesamt, bebaut, unbebaut) sowie die für potenzielle Klassifikationsfehler vor allem determinierenden Kriterien

- Bebauungshöhe (Schattenwurf, Verkippung),
- Vegetationshöhe (Verdeckung durch Bäume),
- spektrale Reflexion (Fehlklassifizierungen),
- Heterogenität (Mischpixel-Problematik).

Die Einführung von Flächentyp-Kategorien ermöglicht im Klassifizierungsprozess unter anderem eine entsprechende Stratifizierung der Stadtfläche für räumlich getrennte Spektralklassifizierungen mit optimierter Methodenauswahl. Zudem finden sie Eingang in die regelbasierte Klassifizierung des Stadtgebiets.

2. Ermittlung von Referenzflächen

Der Auswertungsprozess erfordert Referenzflächen für automatisierte Kartierungen. Es wird ein Referenzflächennetz für das gesamte Stadtgebiet festgelegt, auf das auch in Folgeuntersuchungen zurückgegriffen werden kann (u. a. Kunstbeläge, Sand/Gleisschotter, vegetationslose Flächen, Wald, Rasen). Pro Klasse sollten mindestens 16 Referenzflächen systematisch stadtweit ausgewiesen werden. Sie sollten nicht kleiner als 900 m² sein, möglichst homogene Strukturen aufweisen, in ihrer Nutzung beständig und für terrestrische Kontrollen zugänglich sein.

3. Spektrale Klassifizierung

Ziel der spektralen Klassifizierung ist die Unterscheidung von Vegetationsgraden mittels NDVI sowie die Erfassung von solchen Oberflächenmaterialien, deren Reflexionseigenschaften ohne besondere Berücksichtigung zu erheblichen Fehlkartierungen führen würden. Es resultieren Aussagen auf Pixelbasis (Abbildung 3).

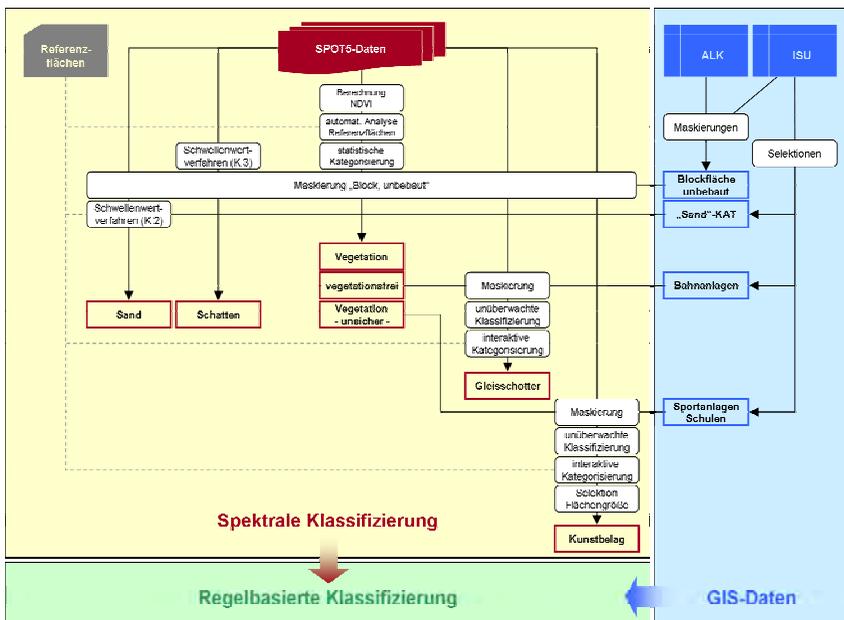


Abb. 3: Schema der spektralen Klassifizierung

Zunächst erfolgt für alle unbebauten Flächen eine Kategorisierung des NDVI. Referenzflächen dienen der automatisierten Ableitung von NDVI-Werten zur Abgrenzung von vollständigen

dig vegetationslosen und vollständig vegetationsbedeckten Flächen (Vegetationsgrad: 0 %, 100 %). Unter Vernachlässigung des nicht-linearen Zusammenhangs zwischen NDVI und Vegetationsgrad wird eine Intervallskalierung des zuvor festgelegten NDVI-Wertebereichs in 10 weitere Kategorien vorgenommen (5 %, 15 %, ... 95 %).

Mit Hilfe der Flächentyp-Kategorien wird nachfolgend eine Stratifizierung der Stadtfäche durchgeführt, um potenzielle Verbreitungsräume von „Problemklassen“ einzugrenzen und diese zu kartieren. So werden beispielsweise flächenhafte Kunstbeläge (z. B. Tartan, Kunst-rasen) ausschließlich innerhalb der Flächentypen „Schule“ und „Sportstätten“ kartiert und ersetzen hier die zuvor ermittelten Vegetationsgrad-Kategorien. Ferner werden Schlagschatten kartiert und nachfolgend separat behandelt, um Fehlklassifizierungen zu reduzieren.

4. Regelbasierte Klassifizierung

Anhand der Ergebnisse der spektralen Klassifizierung werden Versiegelungsgrade abgeleitet. Hierzu wird ein einfaches Regelwerk aufgestellt, mit dem Vegetationsgrade und Materialien-Klassen kontextbezogen den 12 Versiegelungskategorien zugeordnet werden. Es resultieren Aussagen auf Pixelbasis (Abbildungen 4 und 5).

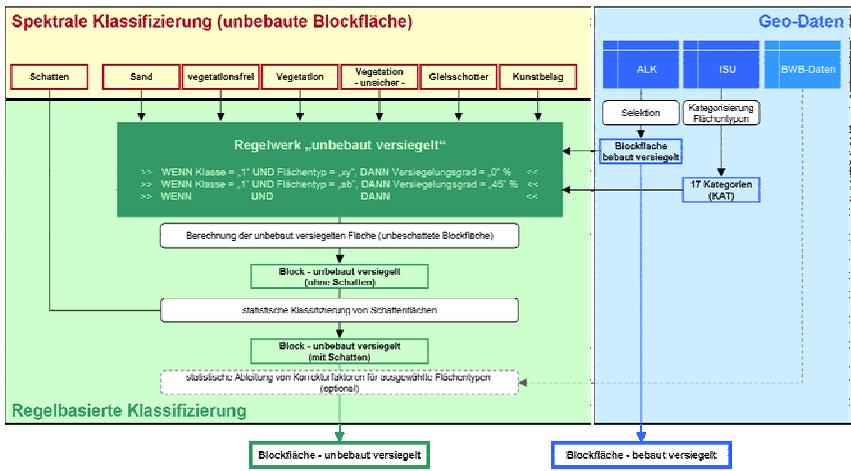


Abb. 4: Schema der regelbasierten Klassifizierung

Ableitung des Versiegelungsgrads

Ziel der Kartierung ist die Ableitung des Versiegelungsgrades auf Blockebene. Es werden dazu absolute und relative Flächenangaben berechnet. Unterschieden werden drei Versiegelungsgrade (VG):

- VG - bebaut versiegelte Fläche,
- VG - unbebaut versiegelte Fläche,
- VG - gesamte versiegelte Fläche.

Für die Ableitung der Versiegelungsgrade werden zunächst die Kartierungsergebnisse der bebaut versiegelten sowie der unbebaut versiegelten Fläche (Versiegelungs-Kategorie, Schatten) mit den Blöcken des ISU verschnitten. Aggregierte Flächenangaben je Klasse und

Blockfläche werden abgeleitet und vektorisiert abgelegt. Für weiterführende Analysen kann somit auf die Rasterdaten der Klassifizierung verzichtet werden.

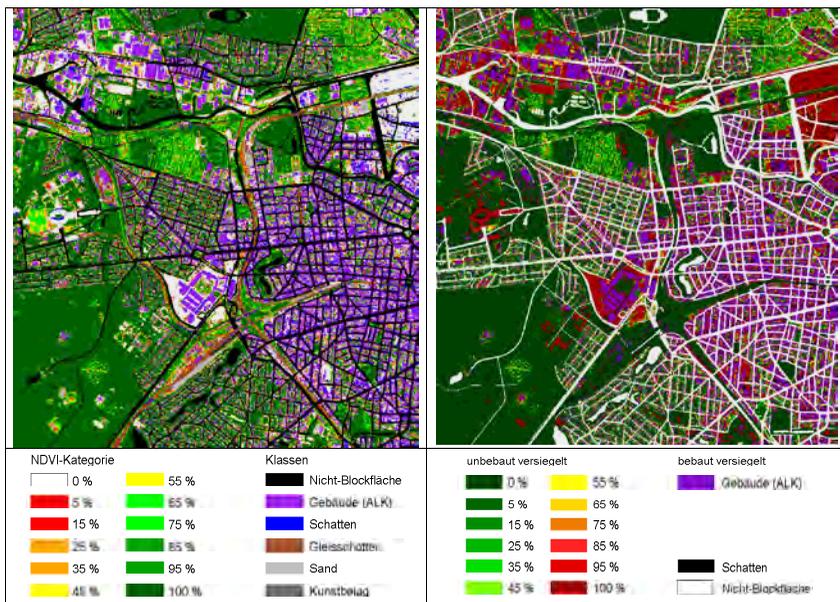


Abb. 5: Kartierungsergebnisse der spektralen (links) und regelbasierten Klassifizierung (rechts)

Die Berechnung der Versiegelungsgrade erfolgt in 3 Schritten:

1. Berechnung der Versiegelungswerte für die jeweils unbebaute, unbeschattete Blockfläche sowie für Flächentyp-Kategorien.
2. Umgebungsbezogene, blockweise Klassifizierung der Schattenflächen auf der Grundlage der zuvor ermittelten Versiegelungswerte der unbebauten, unbeschatteten Blockfläche (größere Flächen: Blockwert; kleinere Flächen: mittlerer Wert der Flächentyp-Kategorie).
3. Neuberechnung der Versiegelungsgrade unter Einbeziehung der klassifizierten Schatten.

Die Nachklassifizierung der Schattenflächen geht von der Annahme aus, dass innerhalb der unbebauten Blockfläche unbeschattete und beschattete Bereiche im Mittel ähnliche Oberflächenbedeckungsarten und damit Versiegelungsgrade aufweisen.

In Abbildung 6 wird exemplarisch das Ergebnis „Gesamtversiegelung (%)“ für ein Teilgebiet dargestellt.

5 Genauigkeitsabschätzung

Für Genauigkeitsabschätzungen wurden aktuelle Luftbilder, ALK- und ISU-Daten sowie die vorhandenen Versiegelungskarten herangezogen. Eine Quantifizierung der Kartierungsergebnisse auf Block- oder Flächentypenebene konnte in der nur viermonatigen Konzeptstudie nicht geleistet werden. Eine systematische Stichprobenerhebung auf der Basis von Luftbildinter-

6 Diskussion und Ausblick

Das vorgestellte Verfahren zeigt gegenüber bisher verfolgten Ansätzen eine Reihe prozessier-
ungstechnischer, wie auch ergebnisrelevanter Vorteile:

- Der Zeitaufwand zur Analyse der Satellitenbild- und Geo-Daten stellt sich bei einmal erarbeitetem Analyseschema als vergleichsweise gering dar.
- Der Ansatz beschränkt die Notwendigkeit terrestrischer Aufnahmen bzw. Kontrollen auf ein erforderliches Mindestmaß.
- Es kann von einer guten Übertragbarkeit, bzw. Wiederholbarkeit ausgegangen werden. Dies liegt einerseits daran, dass anhand eines einmalig zu definierenden Netzes invarianter Referenzflächen die erzielte Güte eines Wiederholungslaufs überprüft werden kann. Andererseits existiert im Rahmen des wissensbasiert über etablierte Geo-Daten gesteuerten Ansatzes ein stabiles Regelwerk, welches im Wesentlichen automatisiert umgesetzt wird.
- Prinzipiell kann eine flexible Sensor- und Szenenauswahl erfolgen, da alle gewählten Ansätze übertragbar sind.

Zwar erfordert die Übertragung des Ansatzes auf das gesamte Stadtgebiet die Erweiterung und Anpassung des Regelwerks (u. a. durch zusätzliche Flächentypen wie Landwirtschaft, Rieselfelder), allerdings kann davon ausgegangen werden, dass das Gros der in Berlin relevanten Flächennutzungen im hier eingesetzten Testdatensatz hinreichend vertreten war.

Insbesondere die Reproduzierbarkeit und Transparenz des Ansatzes müssen weiterhin als Stärken bei der Umsetzung von thematischen Kartierungsverfahren in Kooperationen mit öffentlichen Auftraggebern angeführt werden. Ein großes Manko vieler Studien in diesem Kontext liegt in der fehlenden Reproduzierbarkeit der erzielten Ergebnisse bei einer wiederholten Umsetzung im Abstand einiger Jahre. Dem Monitoring- und Nachhaltigkeitsgedanken eines gesamtstädtischen Planungsansatzes ist die oben dargestellte Verfahrensweise somit zuträglich und eröffnet neue Möglichkeiten zur Fernerkundungs- und Geodaten-basierten Umweltanalyse. Die übertragbaren Ansätze ermöglichen darüber hinaus ein weltweites Einsatzspektrum des Verfahrens im Rahmen stadtökologischer Planungsszenarien.

7 Literaturverzeichnis

- GAMBA, P. & DELL'ACQUA F., 2004: Monitoring urban areas for environment and security through remote sensing. In: Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Proceedings. Vol XXXV, (Working Group III/6) XXth Congress, Istanbul, Turkey 14th - 23rd July 2004. CD ISSN 1682-1777.
- HAAG, L., 2006: Wie hoch sind die Versiegelungsgrade in Berlin wirklich? - Ein Methodenvergleich. Diplomarbeit TU-Berlin (unveröffentlicht), Berlin.
- HOSTERT, P., DIERMAYER, E., DAMM, A. & SCHIEFER, S., 2004: Spectral unmixing based on image and reference endmembers for urban change analysis. In: OLUIC, M. (Hrsg.) New Strategies for European Remote Sensing. Proceedings of the 24th EARSeL Symposium, Dubrovnik, 25th-27th May 2004. Milpress, Rotterdam, 645-652.
- KIM, H.O. & KLEINSCHMIT, B. 2005: Use of High Resolution Satellite Imagery for the Analysis of Sealing in the Metropolitan Area Seoul. In: ERASMI, S. & CYFFKA, B., KAP-

- PAS, M. (Hrsg.): Remote Sensing & GIS for Environmental Studies: Applications in Geography. Göttinger Geographische Abhandlungen, Vol. 113, 281-286.
- KLEINSCHMIT, B., HOSTERT, P., COENRADIE, B. & HAAG, L., 2006: Entwicklung eines hybriden Verfahrensansatzes zur Versiegelungskartierung in Berlin - Konzeptstudie. Abschlussbericht - TU Berlin, Institut für Landschaftsarchitektur und Umweltplanung, Fachgebiet Geoinformationsverarbeitung in der Landschafts- und Umweltplanung, HU Berlin, Geographisches Institut, Abteilung Geomatik, Digitale Dienste Berlin. Im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung (unveröffentlicht), Berlin.
- NETZBAND, M., 1998: Möglichkeiten und Grenzen der Fernerkundung zur Versiegelungskartierung in Siedlungsräumen. IÖR-Schriften 28, Dresden.
- ROESRATH, C. & KITTELBERGER, C., 2001: Konzeptstudie zur Fortschreibung der Versiegelungsdaten mit Hilfe hochauflösender Satellitendaten unter Berücksichtigung der topologischen Fortführung des UIS-Grundlayouts - Abschlussbericht -. Technische Universität Berlin, Institut für Landschaftsentwicklung Fachgebiet Landschaftsplanung, insb. Landschaftspflege und Naturschutz. Im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin (unveröffentlicht), Berlin.
- SENATSV ERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG (SENSTADT) 2004: Digitaler Umweltatlas - 01.02 Versiegelung (Ausgabe 2004).
www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/ia102.htm
- SENATSV ERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG (SENSTADT), 2005a: Berliner Umweltatlas.
<http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/> Zugriff: 15.06.06
- SENATSV ERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG (SENSTADT) 2005b: Liegenschaftskataster - ALK. www.stadtentwicklung.berlin.de/geoinformation/liegenschaftskataster/alk.shtml,
 Zugriff: 15.06.06
- SENATSV ERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG (SENSTADT) 2005c: Digitaler Umweltatlas - Flächentypen.
www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/e_tab/ISU_Flaechentypen_2001.pdf,
 Zugriff: 15.06.06

Spektrale Charakterisierung von Winterweizen für hyperspektrale Fernerkundungsanalysen

WOLFGANG KOPPE¹, MARTIN L. GNYP¹, RAINER LAUDIEN¹, LIANGLIANG JIA², FEI LI², XINPING CHEN² & GEORG BARETH¹

Zusammenfassung: Für die landwirtschaftliche Produktion ist die Zufuhr von Nährstoffen durch Düngung essentiell für optimierten Ertrag, trägt jedoch außerdem zur Boden- und Grundwasserverschmutzung bei. Die detaillierte Untersuchung von Vitalität und Ertrag zu verschiedenen Zeitpunkten kann zur Reduktion des N-Inputs und somit zur Verringerung des N-Eintrages in Boden und Vorfluter beitragen. Um den aktuellen Zustand von Winterweizenbeständen über Spektraleigenschaften zu ermitteln, wird im vorliegenden Forschungsprojekt die Beziehung zwischen spektraler Reflexion (Feldspektrometer) und verschiedenen Bestandsparametern wie Pflanzenstickstoffgehalt, Vitalität und Biomasse in einer umfangreichen Feldkampagne detailliert untersucht. Untersuchungsregion ist hierbei Humin County in der Nordchinesischen Tiefebene. Weiterhin werden zur Ableitung von Bestandsparametern im regionalen Maßstab hyperspektrale Daten (EO-1 Hyperion) und Radardaten (Envisat ASAR) gemeinsam ausgewertet. Die Vorverarbeitung der Satellitendaten spielt dabei eine zentrale Rolle.

1 Einleitung

Das Forschungsprojekt zur Ableitung von Bestandscharakteristiken durch kombinierte Auswertung von Hyperspektral- und Radardaten ist eine Kooperation zwischen dem Dept. Plant Nutrition an der China Agricultural University in Beijing und dem Institut für Geographie der Universität zu Köln. Dabei wurde bewusst eine Region in der Nordchinesischen Tiefebene gewählt. Die Nordchinesische Tiefebene ist die bedeutendste Ackerbauregion Chinas (HERRMANN-PILLATH & LACKNER 2000).

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die Integration moderner Fernerkundungsanalysen in die regionale Agrarökosystemmodellierung. Wichtige Komponenten sind dabei das regionale Stickstoffmanagement sowie die Ertragsmodellierung; hierbei speziell für Winterweizen. Stickstoff (N) ist ein bedeutender Pflanzennährstoff, welcher für optimales Pflanzenwachstum in bestimmten Mengen benötigt wird. Der Mangel an Stickstoff führt einerseits zu limitiertem Pflanzenwachstum und somit zu reduzierten Erträgen. Übermäßiger Eintrag von Stickstoff ist andererseits jedoch für die Kontamination von Boden, Atmosphäre und Grundwasser mitverantwortlich (CHEN et al. 2003). Ein sensibler Umgang mit Stickstoffdüngern ist daher notwendig. In der Nordchinesischen Tiefebene und speziell in der Untersuchungsregion ist der übermäßige Einsatz von N-Düngern ein Problem. Es werden bis zu 600 kg N/ha je Jahr für die Winterweizen/Sommermais-Rotation appliziert (CHEN et al. 2004). Untersuchungen im Bereich Precision Farming fokussieren sich zunehmend auf die Beziehung zwischen Stickstoffdüngung, Pflanzenstickstoffgehalt, Ertrag und Umweltverschmutzung (SERRANO et al. 2000). In diesem Kontext spielen Fernerkundungssensoren aufgrund der Sensitivität für verschiedene Bestandsparameter und der zweidimensionalen Abbildung eine wichtige Rolle (ALBERTZ 2004). Diese Vorteile sollen hierbei mit Hilfe komplementärer Informationen aus Hyperspektral- und Radardaten ausgenutzt werden. Nachfolgend werden erste Ergebnisse der

¹ Universität zu Köln, Institut für Geographie, 50923 Köln. Email: wkoppe@uni-koeln.de

² China Agricultural University (CAU), College of Agricultural Resources and Environment Sciences, Department of Plant Nutrition, 100094 Beijing, China

Spektralanalyse (Feldspektrometer) im Hinblick auf variierende Bestandscharakteristiken von Winterweizen sowie die Vorverarbeitung der Satellitendaten vorgestellt.

2 Untersuchungsregion

Als Untersuchungsregion für das Forschungsvorhaben dient das Huimin County (ca. 1400 km²), wobei die Forschungsstation mit den dazugehörigen Feldern bei 117,4°E und 37,3° N lokalisiert ist. In der chinesischen administrativen Gliederung entspricht ein “County” etwa einem deutschen Landkreis. In Abb.1 ist die geographische Lage der Nordchinesischen Tiefebene und des Huimin County dargestellt. In der Untersuchungsregion befindet sich ein umfassender Feldversuch der landwirtschaftlichen Versuchsstation des Dept. Plant Nutrition. Dadurch sind sehr gute Kontakte zu den Behörden (Vermessung und Agrar) sowie mehrjährige Feldversuchsdaten verfügbar. Das Untersuchungsgebiet wird als repräsentativ in Hinblick auf Böden und Anbausystem für die Nordchinesische Tiefebene angesehen (HERRMANN-PILLATH & LACKNER 2000).

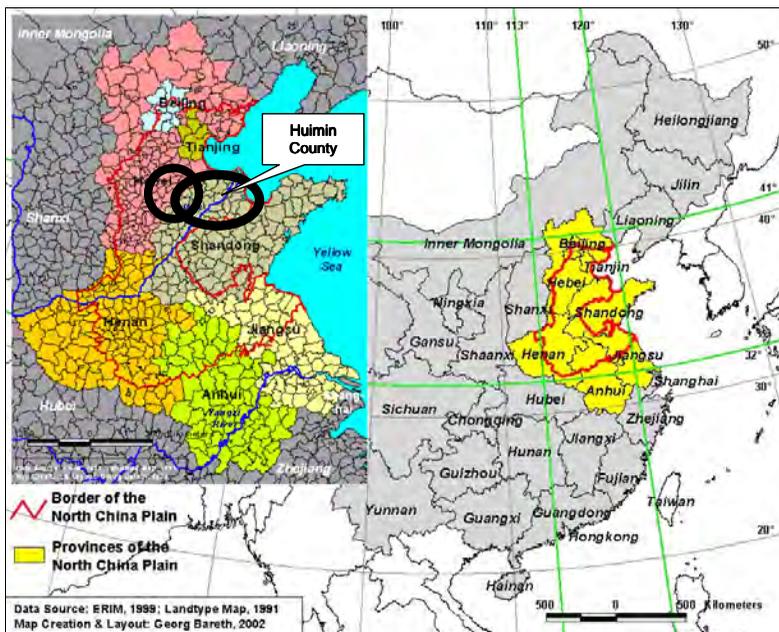


Abb. 1: Geographische Lage der Untersuchungsregion Huimin County

3 Material und Methoden

Die Forschungsarbeit setzt sich aus einer detaillierten Spektralanalyse (Feldspektrometer ASD HandHeld) von Winterweizen unter verschiedenen Stickstoffapplikationsraten und der Ableitung von Bestandsparametern durch Fernerkundungssensoren im regionalen Maßstab

zusammen. Wesentlicher Inhalt der Spektralanalyse ist die Erfassung von Veränderungen der spektralen Reflexion in Abhängigkeit von variierenden Bestandseigenschaften. Es ist beabsichtigt, Erkenntnisse aus der Spektralanalyse auf den Hyperspektralsensor EO-1 Hyperion zu übertragen.

3.1 Messung von Bestandsparametern

In der Untersuchungsregion wurden durch den chinesischen Partner Feldversuche mit sechs verschiedenen Stickstoffraten und vier Replikationen etabliert. Die Größe der Parzellen beträgt im Durchschnitt 100 m². Die Messung verschiedener Pflanzenparameter wurde während der Vegetationsperiode des Winterweizens von Mitte März 2006 bis zur Ernte Mitte Juni 2006 regelmäßig durchgeführt. Ein SPAD-Chlorophyllmeter der Firma Minolta wurde für die wöchentliche Ableitung des Pflanzenstickstoffgehalts verwendet. Zur Kalibrierung der Messwerte erfolgte eine weitere Entnahme von Proben, die im Labor auf N analysiert wurden. Die Biomasse wurde destruktiv in regelmäßigen Abständen durch Entnahme von Pflanzen auf einer Grundfläche von 30 mal 30 cm, Trocknung bei 75°C (24 Stunden) und anschließendem Auswiegen ermittelt. Zur Erfassung des Leaf Area Index (LAI) wurde aufgrund der Flexibilität und der nicht-destruktiven Messung das Sunscan Canopy Analysis System der Firma Delta-T Devices verwendet.

Neben der detaillierten Untersuchung der Parzellen für den Stickstoffsteigerungsversuch erfolgten identische Messkampagnen zu den Aufnahmetermenen der Satellitendaten auf größeren Versuchsflächen (zwischen 5 und 20 ha). Von diesen Flächen sind genaue Managementdaten vorhanden, die anhand von begleitenden Befragungen der Landwirte erfasst wurden. Die Landwirte stellten ihre Felder für die Messkampagnen zur Verfügung.

3.2 Spektralmessungen (Feldspektrometer)

Reflexionsmessungen jeder Parzelle im Spektralbereich von 325 bis 1100 nm wurden mit dem ASD HandHeld durchgeführt. Die optische Einheit des Feldspektrometers befand sich während der Datenaufnahme an einer galgenartigen Konstruktion, so dass ein gleichbleibender Abstand von 150 cm zur Vegetationsoberfläche gewährleistet war. Mehrere Messungen (> 4) wurden für jeden Plot gemittelt. Die Datenaufnahme erfolgte jeweils zur gleichen Tageszeit an wolkenfreien Tagen, um Einflüsse durch Beleuchtungsunterschiede zu minimieren. Die Auswertung der Feldspektrometerdaten unterteilt sich in eine statistische Analyse, um die Sensitivität einzelner Bänder für die erhobenen Bestandsparameter zu ermitteln sowie in die Errechnung von verschiedenen Vegetationsindizes. Exemplarisch sind in Tabelle 1 die Ergebnisse des hNDVI (Hyperspectral Normalized Difference Vegetation Index) aufgeführt. Der hNDVI nach OPPELT & MAUSER (2004) berechnet sich folgendermaßen:

$$\text{hNDVI} = (R_{827} - R_{668}) / (R_{827} + R_{668})$$

wobei R die Reflexion der zugehörigen Wellenlänge (nm) darstellt.

3.3 Satellitendaten

Während der Feldkampagne wurden drei EO-1 Hyperion sowie vier Envisat ASAR Szenen aufgenommen. Die Termine der Satellitendaten sowie Feldmessungen sind der Abb. 2 zu entnehmen. Die Daten des Hyperspektralsensor EO-1 Hyperion sind radiometrisch korrigiert

(Level 1R) und werden in 16-bit Radianzwerten geliefert. Der Sensor zeichnet in 242 Kanälen im Wellenlängenbereich zwischen 400 und 2500 nm auf, wobei 198 kalibriert und somit für die Auswertung verwendbar sind (PEARLMAN et al. 2003). Durch die Aufzeichnung von 198 Kanälen wird eine extrem hohe spektrale Auflösung ermöglicht, welche für jedes Bildelement die Dokumentation eines nahezu kontinuierlichen Spektrums gestattet (KUMAR et al. 2003).

Des Weiteren wird der Radarsensor Envisat ASAR als Träger komplementärer Informationen zu Hyperion eingesetzt. Hierbei wurden vier multipolarimetrische Szenen (Alternating Polarisation Precision Image) in den Polarisationen VV und VH aufgenommen. Drei der vier Aufnahmen liegen im gleichen Track (6168) vor. Der Vorteil des aktiven Systems liegt in der Unabhängigkeit von Tageszeit und Wolkenbedeckung, d. h. auch bei Dunkelheit und Bewölkung sind Aufnahmen möglich. Die Rückstreuung wird dabei durch sensorspezifische Eigenschaften sowie durch Charakteristika der Oberfläche bestimmt (HENDERSON & LEWIS 1998).

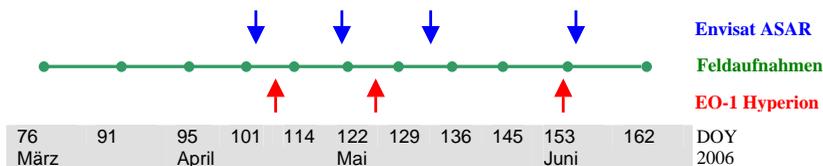


Abb. 2: Termine der Feldmessungen (DOY – Day of Year) sowie aufgenommene Satellitendaten Envisat ASAR und EO-1 Hyperion

4 Ergebnisse

4.1 Biomasse und Pflanzenstickstoffgehalt

In Tab. 1 sind ausgewählte Bestandsparameter des Winterweizens, aufgenommen während der Feldkampagne 2006, von drei Messungen dargestellt. Die Düngemengen steigern sich von 0 kg/ha N auf 260 kg/ha N, wobei 60 kg/ha N dem Optimum (ermittelt nach CHEN et al. 2003)

Tab. 1: Biomasse, Pflanzenstickstoffgehalt und hNDVI für unterschiedliche Stickstoffapplikationsraten zu drei verschiedenen Zeitpunkten

DOY	N Düngung kg/ha N	Biomasse kg /m ²	SPAD	hNDVI
91	0	0,034	44,9	0,33
	40	0,052	48,6	0,39
	60	0,06	49,5	0,38
	80	0,062	50	0,38
	260	0,065	50,6	0,4
101	0	0,062	45	0,55
	40	0,11	47	0,69
	60	0,12	49,6	0,7
	80	0,13	49,7	0,7
	260	0,19	51	0,72
122	0	0,26	49,9	0,68
	40	0,41	53,3	0,81
	60	0,5	53,8	0,83

80	0,59	54,7	0,84
260	0,63	53,7	0,84

und 260 kg/ha N typischen Raten der Region entsprechen. Neben der akkumulierten Biomasse und dem SPAD-Wert ist der hNDVI, ermittelt aus Feldspektrometernmessungen, aufgelistet. Daraus ist ersichtlich, dass unterschiedliche Stickstoffapplikationsraten zu einer großen Variation im Wachstum führen. Alle gemessenen Parameter weisen unter konstanten Bedingungen signifikante Unterschiede auf, wobei höhere N-Raten ein schnelleres Wachstum initialisieren. Mit steigender Zugabe von Stickstoff in den Boden nimmt zum Zeitpunkt 101 DOY ebenso der SPAD-Wert als Indikator für Stickstoff von 45 für 0 kg/ha N bis 51 für 260 kg/ha N zu. Auch die Biomasseakkumulation ist abhängig vom zugeführten N. Sie variiert zum Zeitpunkt 101 DOY zwischen 0,062 kg/m² für 0 kg/ha N und 0,19 kg/m² für 260 kg/ha N. Die Dynamik zu unterschiedlichen phänologischen Stadien zeigt sich beim Vergleich der drei Termine (81, 101 und 122 DOY).

4.2 Spektrale Signaturen des Winterweizens (Feldspektrometer)

Variationen der Struktur der Bestandoberfläche sowie im Pflanzenstickstoffgehalt, verursacht durch unterschiedliche Stickstoffapplikationen und Entwicklungsstadien im Verlauf der Vegetationsperiode, führen zu signifikanten Unterschieden in der spektralen Reflexion (vgl. Abb. 3 a und b). Verschiedene phänologische Stadien des Winterweizens, erfasst in spektraler Reflexion, sind in Abb. 2 a dargestellt. Zum ersten Aufnahmezeitpunkt (76 DOY) ist der Winterweizen erst gering entwickelt und der Boden trägt den größten Teil zur empfangenen Reflexion bei. Die für Vegetation typischen Charakteristiken sind nur ansatzweise im Reflexionsspektrum erkennbar. Während der weiteren Entwicklung werden diese Merkmale deutlicher. Die Reflexion im Bereich des sichtbaren Licht, besonders im Rotbereich, nimmt mit gleichzeitiger Zunahme der Reflexion im nahen Infrarot ab. Mit dem Einsetzen des Reifeprozesses verringert sich der deutliche Unterschied zwischen der Reflexion im sichtbaren Licht und im nahen Infrarot (153 DOY).

Signifikante spektrale Unterschiede lassen sich ebenfalls zwischen den Parzellen unterschiedlicher N-Düngeraten erkennen. In Abb. 3 b sind spektrale Reflexionen für fünf N-Raten zum Zeitpunkt 114 DOY dargestellt. Die spektrale Unterscheidung ist zu diesem Zeitpunkt am deutlichsten ausgeprägt. Bei ansteigenden N-Raten geht die Reflexion im Bereich des sichtbaren Lichts zurück und erhöht sich im nahen Infrarot.

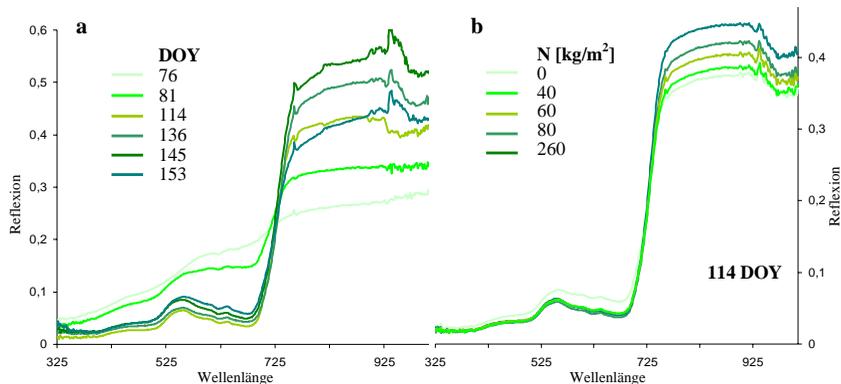


Abb. 3: a: Spektrale Reflexion von Winterweizen zu verschiedenen phänologischen Stadien.
 b: Spektrale Reflexion von Winterweizen zum Zeitpunkt 114 DOY für verschiedene Düngerarten

4.3 Vorverarbeitung der Fernerkundungsdaten

Die Vorverarbeitung der Hyperspektral- und Radardaten ist grundlegend verschieden und umfasst mehrere Schritte. Zunächst werden die Hyperion Level 1R-Daten in ENVI 4.2 importiert. Während des Imports wird die mitgelieferte *Flag-Mask* angewendet, wobei unkalibrierte sowie auf null gesetzte Kanäle eliminiert werden. Der Datenumfang wird durch diesen Prozess von 242 auf 196 Kanäle reduziert. Anschließend werden die 196 verbleibenden Kanäle, die in Radianzwerten vorliegen, über eine Atmosphärenkorrektur in Reflexionswerte umgewandelt. Atmosphärische Streueinflüsse werden dadurch eliminiert (DAT et al. 2003). Der Unterschied zwischen den am Sensor gemessenen Radianzwerten und den Reflexionswerten der Oberfläche ist der Abbildung 4 zu entnehmen. Als letzter Vorverarbeitungsschritt werden die Hyperionszenen auf eine Masterszene (EO-1 ALI) über 45 Passpunkte (RMS Error für Szene 110 DOY: 0,38) georeferenziert.

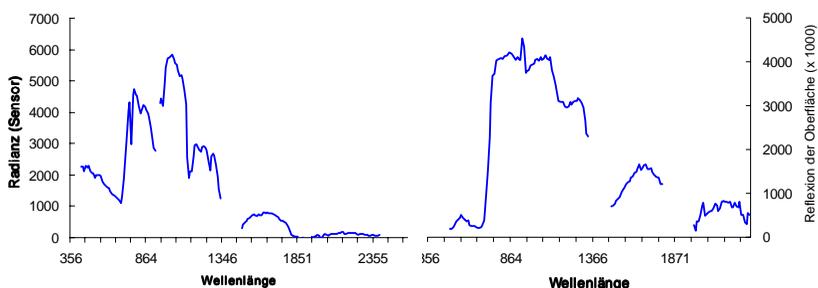


Abb. 4: Spektrale Signatur (EO-1 Hyperion) von Winterweizen vor (a) und nach der Atmosphärenkorrektur (b)

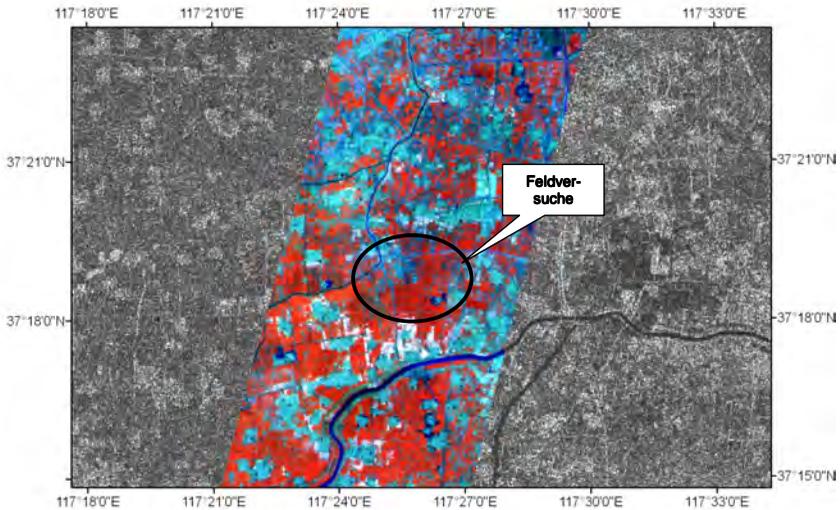


Abb. 5: Falschfarbendarstellung EO-1 Hyperion (110 DOY; R: NIR, G: MIR, B: RED) hinterlegt mit Envisat ASAR AP (104 DOY; Polarisation: VH)

Die Kalibrierung der Envisat ASAR AP erfolgt unter Verwendung der Orbitinformationen in der Software BEST (ESA-Tool). Als Ergebnis wird die Rückstreuung σ^0 (linear) abgeleitet. Ebenfalls in der Software BEST wird die Co-Registrierung der Szenen gleichen Tracks durchgeführt. Aufgrund genauer Orbitinformationen kann für diese Szenen eine Lagegenauigkeit zueinander im Pixelbereich erzielt werden. Anschließend wird auf die kalibrierten und co-registrierten Envisat ASAR Daten eine Speckle-Filterung zur Rauschunterdrückung angewendet. Hierbei wird der in SARSCAPE für ENVI 4.2 implementierte *Frost*-Filter genutzt. Abschließend erfolgt analog zur EO-1 Hyperion-Prozessierung die Georeferenzierung auf eine Masterszene. In der Abb. 5 ist ein Ausschnitt der vorverarbeiteten Satellitendaten abgebildet. Der 7,5 km breite Hyperionstreifen ist mit Envisat ASAR (VH) hinterlegt.

5 Fazit und Ausblick

Erste Ergebnisse der Untersuchung haben gezeigt, dass sich in experimentellen Feldversuchen unterschiedliche Stickstoffapplikationsraten signifikant auf Bestandsparameter wie Pflanzenstickstoffgehalt und akkumulierte Biomasse auswirken. Die Variationen in den Bestandsparametern haben Auswirkungen auf die jeweilige spektrale Signatur des Winterweizenbestands. Somit stellt die Spektrometrie, wie bereits durch SERRANO et al. (2000) herausgestellt, eine vielversprechende Methodik zur Charakterisierung von Winterweizenbeständen dar.

In weiteren Arbeitsschritten steht zunächst die Prüfung der Eignung statistischer Analysen von Feldspektrometerdaten zur Erfassung des Pflanzenzustandes im Vordergrund. Geeignete Spektralbereiche bzw. Zeitfenster für die Ableitung von Stickstoffdefizit und akkumulierter Biomasse sollen detektiert werden. Der Informationsgehalt der *in situ* Reflexionsmessungen wird anschließend mit Reflexionsmessungen des satellitengetragenen Sensors Hyperion verglichen. Eine Übertragung von punktuellen Messungen auf die Fläche wird dabei angestrebt. Untersuchungen von DATT et al. (2003) haben bereits gezeigt, dass bei optimaler Vorverar-

beitung EO-1 Hyperion eine gute Übereinstimmung mit Feldspektrometernmessungen zeigen. Weiterhin wird untersucht, inwiefern Envisat ASAR Daten zu einem zusätzlichen Informationsgewinn beitragen können.

6 Literaturverzeichnis

- ALBERTZ, J., 2004: Einführung in die Fernerkundung. – Darmstadt.
- CHEN, X., BONING-ZILKENS, M., LIAO, X., LIU, X., JU, X., SCHULZ, R., HORLACHER, D., WANG, P., ZHANG, F., CLAUPEIN, W. & ROMHELD, V., 2003: Optimized nitrogen fertilization of irrigated winter wheat by soil Nmin test in Northern China Plain. – In: Ji, L. et al. (Hrsg.): Fertilization in the Third Millennium Fertilizer, Food Security and Environmental Protection. – In: Proceedings of the 12th International World Fertilizer Congress, August 3-9, 2001, Shenyang, China. S. 490-498
- CHEN, X., ZHOU, J., WANG, X., BLACKMER, A. M. & ZHANG, F., 2004: Optimal Rates of Nitrogen Fertilization for a Winter Wheat-Corn Cropping System in Northern China. – Communication in Soil Science and Plant Analysis, 35 (3): S. 583-597
- DATT, B., MCVICAR, T. R., VAN NIEL, T. G., JUPP, D. L. B. & PEARLMAN, J. S., 2003: Pre-Processing EO-1 Hyperion Hyperspectral Data to Support the Application of Agricultural Indexes. – IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41 (6): S. 1246-1259
- HENDERSON, F. M. & LEWIS, A. J., (Hrsg.), 1998: Principles & Applications of Imaging Radar. Manual of Remote Sensing. – New York
- HERRMANN-PILLATH, C. & LACKNER, M., (Hrsg.), 2000: Länderbericht China. - Schriftenreihe der Bundeszentrale für politische Bildung, 351 – Bonn.
- KHURSHID, K. et al., 2006: Preprocessing of EO-1 Hyperion data. – Canadian journal of Remote Sensing, 32 (2): S. 84-97
- KUMAR, L., SCHMIDT, K., DURY, S. & SKIDMORE, A., 2003: Imaging spectrometry and vegetation science. – In: MEER, F.D. VAN DER, JONG, S.M. DE, (Hrsg.): Imaging Spectrometry. – Dordrecht
- OPPELT, N. & MAUSER, W., 2004: Hyperspectral monitoring of physiological parameters of wheat during a vegetation period using AVIS data. – International Journal of Remote Sensing, 25 (1): S. 145-159
- PEARLMAN, J. S., BARRY, P. S., SEGAL, C. C., SHEPANSKI, J., BEISO, D. & CARMAN, S. L., 2003: Hyperion, a Space-Based Imaging Spectrometer. – IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41 (6): S. 1160-1173
- SERRANO, L., FILELLA, I. & PENUELAS, J., 2000: Remote Sensing of Biomass and Yield of Winter Wheat under Different Nitrogen Supplies. – Crop Science, 40: S. 723 - 731

Extraktion von Landbedeckungsinformationen - Ein automatisierter Ansatz mittels multitemporaler C-Band Daten

T. RIEDEL¹, C. THIEL, C. SCHMULLIUS & K.-H. FRANKE²

Zusammenfassung: Die Verfügbarkeit von aktuellen und zuverlässigen Landbedeckungskarten ist für viele Anwendungsgebiete in den Erdwissenschaften von herausragender Bedeutung. Das Envisat-Projekt verfolgt die Entwicklung innovativer Methoden zur Ableitung von Landbedeckungsinformationen unter Verwendung von optischen und SAR Daten. Ein Projektziel, die Klassifikation der Hauptlandbedeckungsklassen Wasser, Wald, landwirtschaftliche Nutzflächen / Grünland und Siedlungen, soll dabei vollautomatisch ablaufen. Als Testgebiet für die Untersuchungen wurde der östliche Harz sowie die südlich angrenzenden Regionen einschließlich des Kyffhäusers gewählt. Im Zeitraum vom April bis Dezember 2005 wurden über dem Gebiet kontinuierlich optische und SAR Daten erhoben. Die Zeitreihen umfassen u.a. 17 Envisat ASAR APP und 10 ERS-2 Szenen.

Zur Ableitung der vier Hauptlandbedeckungsklassen wird ein hierarchisches, objektbasiertes Klassifikationsschema vorgeschlagen. Die Ableitung der Bildsegmente wurde mit der eCognition Software auf Basis von Landsat-5 TM Daten durchgeführt. Die Unterscheidung der vier Landbedeckungskategorien erfolgte anschließend durch die Anwendung charakteristischer, klassenspezifischer Bildmerkmale wie z.B. Schwellwerte für den mittleren Radarrückstreuoeffizienten, Ratios und Texturparameter, wobei im Rahmen dieses Artikels der Klassifikationsansatz für die SAR-Daten vorgestellt werden soll. Für die Kartierung von Siedlungsgebieten ist der Einsatz geeigneter Texturparameter von besonderer Bedeutung. Das Potential der NGLD-Matrix, die in der Fernerkundung nur selten Anwendung findet, wird demonstriert. Zur Ausweisung der Hauptlandbedeckungsklassen auf alleiniger Basis von SAR-Daten werden als Minimalanforderung 3 Szenen in HH- und HV-Polarisation benötigt, wobei die Akquisition der Daten im Frühjahr und kurz vor Beginn sowie nach der Haupterntezeit erfolgen sollte. Durch den zusätzlichen Einsatz von VV-polarisierten Datensätze konnte kein weiterer Informationsgewinn festgestellt werden.

1 Einleitung

Die Verfügbarkeit von zuverlässigen und aktuellen Landbedeckungsinformationen ist für eine Vielzahl von Anwendungen auf unterschiedlichen Maßstabsebenen von herausragender Bedeutung. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang beispielsweise die Beobachtung des Landnutzungswandels und der Landdegradation in bestimmten Regionen, die Aktualisierung von Karteninformationen, Management- und Planungsaktivitäten sowie die Umsetzung und Kontrolle nationaler und internationaler Übereinkommen (FRANKLIN & WULDER, 2002 und JENSEN, 2000).

Die Erdebeobachtung bietet die einzigartige und kostengünstige Möglichkeit zur Erhebung räumlich konsistenter und aktueller Daten. In Hinblick auf eine operationelle Anwendung der Techniken der Fernerkundung ist aus Kostengründen die Entwicklung von halb- und vollau-

¹ T. Riedel, Dr. C. Thiel & Prof. C. Schmullius, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fernerkundung, Löbdergraben 32, D-07737 Jena, e-mail: tanja.riedel@uni-jena.de

² Prof. K.-H. Franke, Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung e.V. (ZBS), Gustav Kirchhoff Straße 5, 98693 Ilmenau

tomatischen, auf andere Gebiete übertragbaren Verfahren von herausragender Bedeutung. Ziel des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR e.V.) geförderten Envidand-Projektes (FKZ 50EE0405) ist die Entwicklung von Methoden zur integrativen Nutzung von SAR und optischen Instrumenten zur Ableitung von Landbedeckungsinformationen. Im Rahmen des Projektes soll hierfür ein Software-Prototyp entwickelt werden, in dem Module zur Vorverarbeitung als auch zur Segmentierung und Klassifikation von Fernerkundungsdaten implementiert sind. Im Zuge der 1. Projektphase ist der Entwurf eines automatischen Klassifikationsschema zur Ableitung der Hauptlandbedeckungsklassen Wasser, Wald, Siedlung und landwirtschaftliche Nutzflächen / Grünland vorgesehen. Die vorgeschlagene Methodik sollte unabhängig von Aufnahmezeitpunkt und -gebiet robuste Ergebnisse für Daten unterschiedlicher Sensoren liefern. Da aufgrund von Bewölkung die Anzahl der verfügbaren optischen Szenen häufig begrenzt ist, wurde der Schwerpunkt dieser Arbeit darauf gelegt, ein Klassifikationsschema zu entwickeln, das den Schwerpunkt auf den Informationsgehalt multitemporaler SAR-Daten legt. Dieser Artikel präsentiert erste Ergebnisse, die im Rahmen des Teilprojektes „Skalenintegration“ erzielt wurden.

2 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage

Als Untersuchungsgebiet wurden der Harz und die südlich angrenzenden Gebiete einschließlich des Kyffhäusers gewählt und umfasst sowohl landwirtschaftlich geprägte, als auch stark bewaldete und reliefierte Bereiche. Eine Landsat-5 TM RGB Komposite vom 21. April 2005 ist in der Kanalkombination 5-4-3 in Abbildung 1 dargestellt.

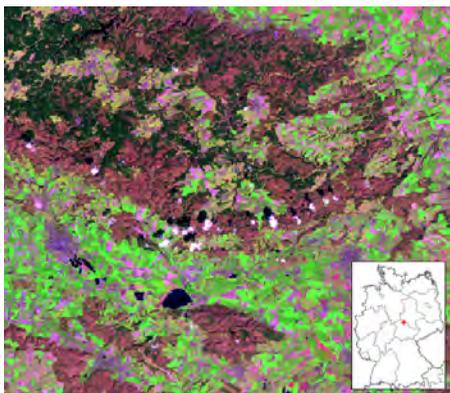


Abb. 1: Landsat-5 TM Szene des Untersuchungsgebiets vom 21. April 2005

Im Zeitraum vom April bis Dezember 2005 wurden kontinuierlich optische und SAR Daten über dem Testgebiet akquiriert. Die im Rahmen des Teilprojektes zur Verfügung stehenden Datensätze sind in Abbildung 2 dargestellt, wobei im Rahmen dieser Studie vornehmlich auf die Landsat-5 TM, Envisat ASAR APP und ERS-2 Daten zurückgegriffen wurde. Durch die nahezu simultane Aufnahme der ERS-2 und ASAR APP Daten in HH/HV-Polarisation stehen für mehrere Zeitpunkte C-Band SAR Daten in allen Polarisierungen zur Verfügung.

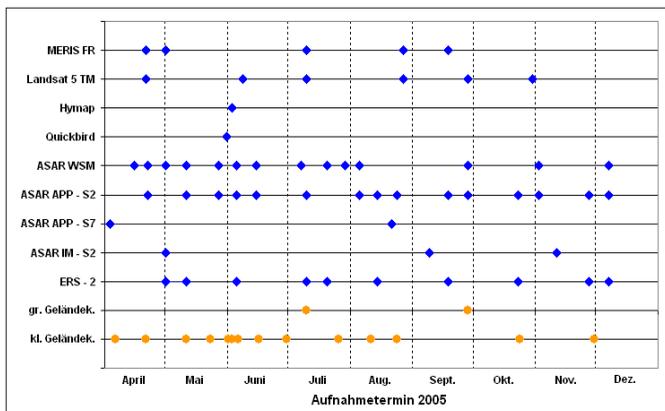


Abb. 2: Datengrundlage

3 Methodisches Vorgehen

Die Ableitung der Landbedeckungsinformationen erfolgt über einen objektbasierten, hierarchischen *decision tree* Klassifikationsansatz. Ein großer Vorteil dieser Methode ist in deren einfachen Übertragbarkeit auf andere Gebiete zu sehen, was in Hinblick auf eine Operationalisierung von großer Bedeutung ist. Der erste Prozessierungsschritt umfasste die Vorverarbeitung der zur Verfügung stehenden Fernerkundungsdaten mittels gängiger Verfahren. Die Kalibrierung und Georeferenzierung der SAR-Daten erfolgte mit der Gamma-Software. Da Teile des Untersuchungsgebietes durch starkes Relief charakterisiert sind, wurde darüber hinaus eine topographische Normalisierung nach dem von STUSSI et al. (1995) vorgeschlagenen Verfahren durchgeführt. Die Vorverarbeitung der optischen Daten beinhaltete eine Atmosphärenkorrektur mit ATCOR 2 sowie eine Orthorektifizierung auf Basis des C-Band SRTM DEMs.

Im Anschluss an das Preprocessing der Fernerkundungsdaten wurden unter Anwendung des in der eCognition Software implementierten *multiresolution segmentation* Ansatzes (BAATZ & SCHÄPE, 2000) homogene Bildobjekte auf Basis der Landsat-5 TM Daten abgeleitet, wobei der *Scale*-Faktor stufenweise erhöht wurde. Die Segmentierung erfolgte anhand der optischen Daten mit der Absicht eine bestmögliche Abgrenzung der einzelnen Landnutzungskategorien zu erreichen und steht somit im Einklang mit dem Projektziel, das eine synergetische Nutzung der optischen und SAR Daten vorsieht. Die Zuordnung einer Landnutzungsklasse zu jedem Objekt erfolgte über charakteristische Grenzwerte der Radarrückstreuung, Rückstreuerratio sowie Texturinformationen. Zur optimalen Auswahl dieser Bildmerkmale wurden die SAR-Zeitreihen systematisch analysiert und die Ergebnisse mit Informationen aus verfügbaren Datenbanken abgeglichen (z.B. European Radar-Optical Research Assemblage library - ERA-ORA). Insbesondere zur Abgrenzung von städtischen Gebieten wurde auf Texturinformationen zurückgegriffen, auf deren Bedeutung in der Literatur mehrfach hingewiesen wurde (DEKKER, 2003; DELL'ACQUA & GAMBA, 2003 und NYOUNGUI et al., 2002). Im Rahmen dieser Studie wurde das Potential verschiedener Texturmaße wie Standardabweichung, Datenstreuung und auf Basis der *co-occurrence* Matrix abgeleitete Parameter zur Siedlungskartierung untersucht. Ein in der Fernerkundung nur selten eingesetztes Verfahren zur Ableitung von Texturinformationen besteht in der Berechnung der Grauwertabhängigkeitsmatrix

(NGLD). Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in seiner Richtungsunabhängigkeit. Im Zuge dieser Arbeit wurde die NGLD-Matrix auf Grundlage eines 5x5 Pixel großen *moving window* berechnet. Für jedes Pixel des Untersuchungsfensters wird dabei geprüft, inwieweit für alle benachbarten Pixel mit der Entfernung d eine zu definierende Relation erfüllt ist. Die Anzahl aller Pixel nr , die diese Relation erfüllen, wird in den Reihen der NGLD-Matrix festgehalten. Für $d = 1$ besitzt die NGLD-Matrix somit 5 Reihen ($nr = 0$ bis 4). Die Spalten der NGLD-Matrix repräsentieren hingegen den Grauwert gw der Pixel, d.h. im Falle eines 8-bit Bildes umfasst die NGLD-Matrix 255 Spalten. Die Elemente der NGLD-Matrix beschreiben schließlich die Häufigkeit, mit der die möglichen Kombinationen von gw und nr im Untersuchungsfenster auftreten. Analog zur weit verbreiteten *co-occurrence* Matrix können auf Grundlage der NGLD-Matrix zahlreiche Texturmaße extrahiert werden wie z.B. *entropy*, *energy*, *minimal* und *maximal emphasis*. Das Potential der verschiedenen Texturparameter zur Siedlungskartierung wurde auf Grundlage von Trennbarkeitsanalysen und der ermittelten Klassifikationsgenauigkeiten abgeschätzt. Die Jeffries-Matusita Distanz (JM-Distanz) stellt ein in der Fernerkundung häufig zum Einsatz kommendes Maß zur Abschätzung der Separierbarkeit zweier Klassen dar. Dabei ist ein Wert von 0 ein Indiz für keine und ein Wert von 1414 für eine sehr hohe Klassentrennbarkeit.

Die Genauigkeit der generierten Kartenprodukte wurde über die Berechnung der Konfusionsmatrix mit der eCognition Software ermittelt. Die zur Berechnung der Konfusionsmatrix verwendeten Referenzsegmente wurden auf Grundlage der räumlich hochaufgelösten optischen Daten (Quickbird und Hymap) sowie von Schwarz-Weiß-Luftbildern mit einer reduzierten Auflösung von 2m bestimmt. Die Robustheit des vorgeschlagenen Klassifizierungsschemas wurde durch die Anwendung auf verschiedene Datensätze von 2005 sowie auf einen Datensatz von 2003 überprüft. Eine Übertragung auf andere Gebiete in Europa steht noch aus.

4 Ergebnisse und Diskussion

Der zur Klassifikation der SAR Daten angewandte *decision tree* ist in Abbildung 3 dargestellt und soll im Folgenden näher erläutert werden.

Der erste Prozessierungsschritt des hierarchischen Klassifikationsverfahrens liegt in der Kartierung von Wasserflächen. In HV-polarisierten Datensätzen sind diese durch eine sehr niedrige Radarrückstreuung während des gesamten Jahres charakterisiert. Der Anstieg des Radarsignals gegen Ende des Jahres 2005 ist durch das Ablassen einiger Fischteiche und der Kelbra-Talsperren zu erklären. Zur Ausmaskierung von Wasserflächen sind kurz vor der Haupterntezeit Ende Juli / Anfang August aufgenommene Szenen besonders geeignet. Zu diesem Zeitpunkt sind nahezu alle Felder durch eine Rückstreuung über -19 dB gekennzeichnet (Abb. 4). Insbesondere im Frühjahr treten hingegen starke Überschneidungen mit unbestandenen oder spärlich bewachsenen Ackerflächen auf und der Einsatz multitemporaler Szenen ist erforderlich. Co-polarisierte C-Band Daten sind für eine vollautomatische Detektion von Wasserflächen ungeeignet. Im Jahresverlauf sowie innerhalb einer einzigen Szene treten in Abhängigkeit von der Oberflächenrauigkeit sehr starke Schwankungen in der Radarrückstreuung auf und stehen einer operationellen Ausweisung auf Basis von Schwellwerten entgegen.

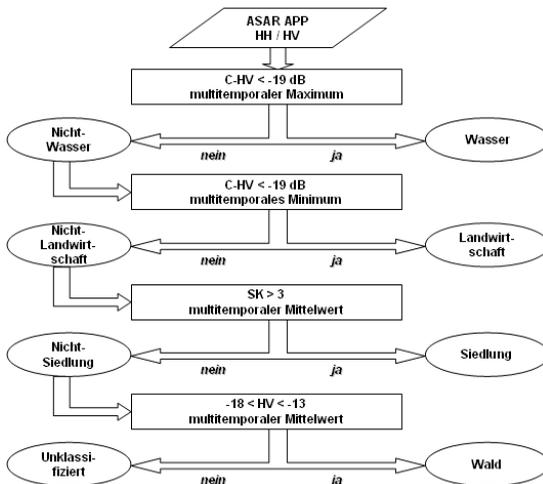


Abb. 3: *decision tree* für ASAR APP HH/HV Daten

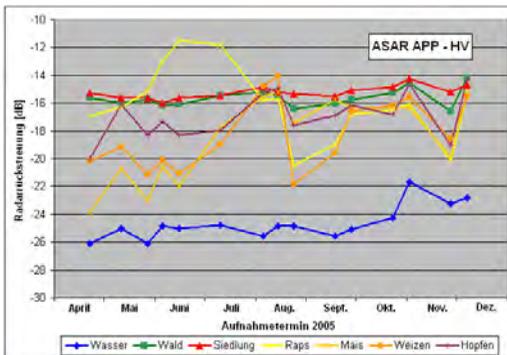


Abb. 4: Jahresgang der Radarrückstreung in HV-polarisierten C-Band Daten

Landwirtschaftliche Nutzflächen sind durch eine sehr starke Variation des Radarsignals im Laufe einer Vegetationsperiode gekennzeichnet. Zur Kartierung dieser Flächen einschließlich der Grünlandareale wird das multitemporale Minimum im C-HV Band vorgeschlagen. Besonders geeignet ist hierbei die Kombination einer Aufnahme aus dem Frühjahr und nach der Haupterntezeit Mitte bis Ende August. Zu Beginn der Vegetationsperiode sind viele Felder noch unbestanden bzw. die Feldfrüchte befinden sich in einem sehr frühen Wachstumsstadium und können aufgrund der niedrigen Radarrückstreung kartiert werden. Nicht erfassbar sind zu diesem Termin Raps und einige Wintergetreidefelder, die allerdings durch Hinzunahme des zweiten Aufnahmeterrains kartiert werden können. Steht keine nach der Haupterntezeit akquirierte HV-polarisierte SAR-Szene zur Verfügung, so ist eine Ausweisung der Rapsfelder alternativ durch deren charakteristischen, starken Anstieg der Radarrückstreung zwischen April und Juni möglich. Allerdings ist hierbei mit deutlich geringeren Klassifikationsgenauigkeiten zu rechnen.

Die dritte auszuweisende Landnutzungskategorie im vorgestellten *decision tree* sind urbane Gebiete. Eine Kartierung der Siedlungsflächen auf alleiniger Basis von multitemporalen Rückstreuintensitäten und deren Standardabweichung über die Zeit erbrachte keine vielversprechenden Ergebnisse. Im Rahmen dieser Studie wurde deshalb das Potential verschiedener Texturparameter getestet. Eine Auswahl verschiedener Texturparameter, die auf Grundlage der HH-polarisierten ASAR APP Szene vom 22. April 2005 abgeleitet wurden, ist in Abbildung 5 dargestellt. Eine visuelle Interpretation der Texturbilder deutet ein hohes Potential der NGLD-Matrix zur Kartierung urbaner Gebiete hin. Zur Berechnung der NGLD-Matrix wurde für die Relation r eine Differenz von 0,1 zwischen benachbarten Pixeln mit einem Abstand d von 1 und 2 Pixeln definiert. Zur Festlegung dieser Relation wurden für verschiedene Testgebiete statistische Analysen durchgeführt. Es zeigte sich, dass im Gegensatz zu den anderen Hauptlandbedeckungsklassen in urbanen Gebieten über 40 % der benachbarten Pixel durch eine Differenz des Radarrückstreusignals von über 0,1 charakterisiert sind. Ein weiteres Merkmal von Siedlungsgebieten ist eine hohe Rückstreuung in co-polarisierten Datensätzen. Der auf der Basis der NGLD-Matrix berechnete Texturparameter, der im Folgenden als SK bezeichnet wird, trägt beiden oben genannten Eigenschaften Rechnung und ergibt sich aus folgender Formel:

$$SK = \sum_{gw=0}^{gz-1} \sum_{nr=0}^N Q_d(gw, nr) * n_r * gw$$

mit gw = Radarrückstreuung in HH-Polarisation
 n_r = Anzahl der Pixel, die Relation erfüllen
 Q_d = Häufigkeit des Auftretens der Kombination gw und n_r im Untersuchungsfenster

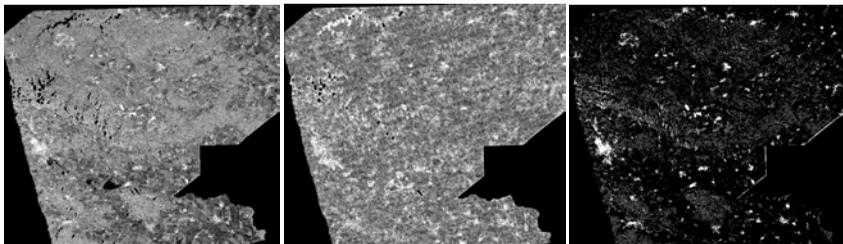


Abb. 5: SAR-Bild (links) und abgeleitete Texturparameter *entropy* (Mitte) und SK (rechts)

Im Zuge der Texturanalysen wurde der Einfluss der Fenstergröße, die zur Berechnung des Texturmaßes verwendet wurde, auf die Klassentrennbarkeit und das Klassifikationsergebnis analysiert. Die zur Berechnung der JM-Distanzen verwendeten AOIs wurden auf Siedlungsbereiche mit geringer Bebauungsdichte und hohem Vegetationsanteil gelegt, wie z.B. Wohngehenden mit Einfamilienhäuser, Schrebergärten und Dörfer. Hintergrund für diese Vorgehensweise ist, dass die Klassifikation und Trennbarkeit dieser Gebiete von den anderen Landnutzungskategorien als besonders kritisch anzusehen ist. Für alle Texturparameter mit Ausnahme von SK konnte ein signifikanter Anstieg der JM-Distanzen mit zunehmender Fenstergröße festgestellt werden (Abb. 6). Des Weiteren deuteten die Analysen für folgende Parameter ein hohes Potential zur Kartierung urbaner Flächen an, was durch die Klassifikationsergebnisse bestätigt werden konnte: Standardabweichung, SK sowie die *co-occurrence* Maße *entropy*, *dissimilarity* und *angular second moment*. Generell ist festzuhalten, dass durch star-

kes Relief charakterisierte bewaldete Gebiete in unmittelbarer Nachbarschaft zu Radarschatten- und Overlay-Bereichen häufig als Siedlung fehlklassifiziert werden. Die besten Klassifikationsergebnisse wurden insgesamt für den Texturparameter SK erzielt (Tab. 1 - Inputdatensätze: 22. April, 14. August und 24. August 2005). Unabhängig von der Jahreszeit können bereits mit monotemporalen Daten verhältnismäßig gute Klassifikationsergebnisse erzielt werden.

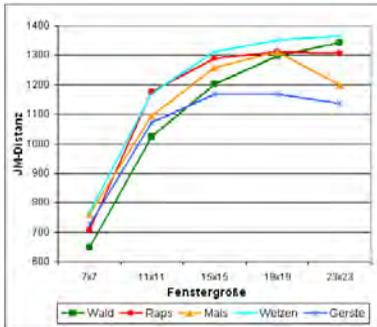


Abb. 6: Einfluss der zur Texturextraktion verwendeten Fenstergröße auf die Trennbarkeit urbaner Gebiete von anderen Landnutzungsklassen

Tab. 1: Klassifikationsgenauigkeiten für urbane Gebiete mittels verschiedener Texturparameter

	Standardabweichung	<i>co-occ. dissimilarity</i>	SK
Nutzergenauigkeit	79,3	73,1	87,2
Herstellergenauigkeit	89,3	82,4	87,7

Alle Segmente, die keiner der drei Klassen Wasser, Landwirtschaft / Grünland und Siedlung zugewiesen wurden, werden als Wald klassifiziert, unter der Bedingung, dass die Radarrückstreuung in C-HV einen Wert zwischen -18 und -13 dB annimmt.

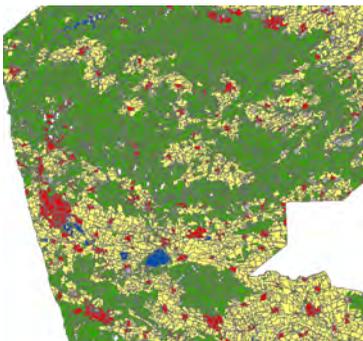


Abb. 7: abgeleitete Landnutzungskarte

In Abbildung 7 ist die unter Anwendung des vorgestellten Klassifikationsschemas abgeleitete Landnutzungskarte dargestellt. Als Eingangsdateien dienten aus den oben genannten Gründen HH- und HV-polarisierte ASAR APP Daten vom 21. April, 14. und 24. August 2005. Die Klassifikationsgenauigkeit beträgt 88,3% (Tab. 2). Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass zur

Berechnung der Konfusionsmatrix nur Segmente herangezogen wurden, die eindeutig einer Landnutzungsklasse zuzuordnen waren und keine Mischformen enthielten.

Tab. 2: Klassifikationsgenauigkeit

	Wasser	Wald	Landw. / Grünland	Siedlung
Nutzer Genauigkeit	98,3	88,5	90,1	88,5
Herstellergenauigkeit	95,1	90,5	86,0	90,5

5 Zusammenfassung

Inhalt dieser Studie war die Vorstellung eines objektbasierten *decision tree* Klassifikationsansatzes zur Ableitung von Hauptlandbedeckungskategorien aus multitemporalen SAR Daten. Zum Erreichen einer hinreichenden Genauigkeit der abgeleiteten Kartenprodukte sind mindestens drei Eingangsszenen aus dem Frühjahr sowie kurz vor und nach der Haupterntezeit in dem entsprechenden Gebiet notwendig. Der vorgestellte Ansatz basiert dabei auf der Verwendung von HH- und HV-polarisierten ASAR Daten im alternierenden Polarisationsmodus. Eine zusätzliche Einbindung von VV-polarisierten Daten erbrachte keine Verbesserung der Ergebnisse. Des Weiteren wurde im Rahmen der Studie das Potential der NGLD-Matrix zur Ableitung von Texturinformationen demonstriert. Diese stellt ein geeignetes Maß zur Kartierung von Siedlungsgebieten dar. Die Übertragbarkeit des vorgestellten Algorithmus auf andere Gebiete in Europa wird Gegenstand zukünftiger Analysen sein.

6 Danksagung

Für die Bereitstellung der Envisat ASAR und ERS-2 Daten im Rahmen des *Category-1* Projektes 3115 gilt unser besonderer Dank der Europäischen Luft- und Raumfahrtbehörde ESA.

7 Literatur

- DEKKER, R. J., 2003: Texture analysis and classification of ERS SAR images for map updating of urban areas in The Netherlands. - IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41(9), pp. 1950 – 1958.
- DELL' ACQUA, F. & P. GAMBA, 2003: Texture-based characterization of urban environments on satellite SAR images. - IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41(1), pp. 153 – 159.
- FRANKLIN, S. E. & M. A. WULDER, 2002: Remote sensing methods in medium spatial satellite data land cover classification of large areas. - Progress in Physical Geography, 26(2), pp. 173 – 205.
- JENSEN, J. R., 2000: Remote sensing of the environment – an earth resource perspective. - Prentice Hall, New Jersey.
- NYOUNGUI, A. D., E. TONYE & A. AKONO, 2002: Evaluation of speckle filtering and texture analysis methods for land cover classification from SAR images. International Journal of Remote Sensing, 23(9), pp. 1895 – 1925.
- STUSSI N., A. BEAUDOIN, T. CASTEL & P. GIGORD, 1995: Radiometric correction of multi-configuration spaceborne SAR data over hilly terrain. - Proceedings of International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, Toulouse, France, 10-13 October 1995, pp. 469-478.

Methodischer Ansatz zur semantischen Interoperabilität von Landbedeckungsdaten im nationalen Verbundprojekt DeCOVER

ROLF LESSING¹ & CHRIS SCHUBERT¹

Zusammenfassung: Das Vorhaben DeCOVER initiiert die Entwicklung eines nationalen Landbedeckungsdienstes. Innerhalb dieses Vorhabens spielen Fragen der Interoperabilität eine wichtige Rolle. Zentraler Aspekt ist die Abbildung von Relationen zwischen den verschiedenen LandCover-Nomenklaturen. Bestehende Datengrundlagen werden hinsichtlich inhaltlicher und geometrischer Gemeinsamkeiten beschrieben, um Synergien für die Datenaktualisierung zu schaffen und den Datenaustausch zu vereinfachen. Im Rahmen dieser Abhandlung soll kurz über die laufenden methodischen Entwicklungen im Rahmen des DeCOVER - Vorhabens informiert werden. Dabei geht es um die Darstellung und Nutzung von Ontologien im Bereich der Landbedeckungsklassifikationen.

1 Einführung

Aktuelle Landbedeckungsdaten sind für viele öffentliche Aufgaben eine wichtige Informationsgrundlage. An der Schnittstelle zwischen europäischer und nationaler Ebene wird die Nachfrage an adaptierten und konsistenten Datensätzen im Bereich der Landbedeckung und Landnutzung immer größer. Die im nationalen Rahmen verfügbaren Datensätze CORINE Land Cover (CLC), das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS[®]) und die Biotop- und Nutzungstypenkartierung (BNTK) weisen hinsichtlich ihrer Aktualität und Qualität regionale Unterschiede auf. Der europäische Rahmen wird durch Direktiven vorgegeben, die eine räumlich explizite Berichterstattung für die Agrar-, Umwelt-, Wasser-, Bodenschutz-, Naturschutz-Anwendungen sowie für die Raumplanung in einheitlicher Qualität fordern.

DeCOVER ist ein nationales Verbundprojekt, bestehend aus 11 Projektpartnern aus Forschung und Wirtschaft. Mit dem Verbundvorhaben DeCOVER wird ein Konzept zur bundesweiten Aktualisierung und Fortführung von Landbedeckungsdaten mittels operationeller und kostengünstiger Prozessierungsverfahren entwickelt. Der Lösungsansatz liegt in der Entwicklung von Modellen, die Relationen zwischen den verschiedenen Nomenklaturen einbeziehen. Grundlage dafür bildet die Entwicklung eines DeCOVER-Objektartendienstes, mit Überführungs- und Aktualisierungsdiensten zu den Objektartenkatalogen von ATKIS, BNTK, CLC und GMES-GSE Land.

Der Ansatz für die Überführung von Landbedeckungsinformationen liegt in der semantischen Formalisierung der Fachinhalte in Form von Ontologien. Dabei soll eine Vergleichbarkeit der Objektarten auf Definitionsebene erreicht werden. Die Entwicklung eines gemeinsamen Basisvokabulars der Objektarten-Eigenschaften stellt diese Vergleichbarkeit her. Darauf basierend können mit Hilfe verschiedener Methoden Aussagen zur Überführbarkeit von Ausgangsobjektarten in Zielobjektarten getroffen werden. Bei der Überführung spielen neben den rein semantischen Gesichtspunkten auch Aspekte der Geometrie und Topologie eine Rolle. Zum einen müssen diese in geeigneter Form beschrieben werden, zum anderen muss die Abbildung von Geometrie und Topologie von einer Nomenklatur in die andere formuliert werden. Dabei kann beispielsweise die Aggregation mehrerer Objekte erforderlich sein. Über die DeCOVER-Klassifikation können Informationen zur Landbedeckung in bestehende Landbedeckungsdatenbasen übertragen werden. Auf diese Weise lassen sich Synergien zwi-

¹ Dr. Rolf Lessing, Chris Schubert, DELPHI InformationsMusterManagement GMBH, Dennis-Gabor-Str. 2, 14469 Potsdam, Telefon: 03316200026, e-mail: [rolf.lessing | chris.schubert}@delphi-imm.de](mailto:{rolf.lessing | chris.schubert}@delphi-imm.de)

schen den Datenbanken nutzen. Diese methodische Unterstützung bei der Überführung von tatsächlichen Objekten der Datensätze führt zu einer Aufwandsreduzierung für die Erhebung von Landbedeckungsdaten und somit zur Kostensenkung für die Aktualisierung.

2 Semantische Interoperabilität als Anforderung

Interoperabilität als ein Begriff der Informationstechnologie beschreibt Methoden, um heterogene und unabhängige Systeme und Datenquellen auf effiziente und verwertbare Art und Weise auszutauschen und dem Benutzer zur Verfügung zu stellen. Hier sind Abstimmungen zwischen den Systemen notwendig. Dazu dienen in der Regel die Einhaltung gemeinsamer Standards. Um dies zu erlangen, muss sowohl die syntaktische Interoperabilität als auch die semantische Interoperabilität erreicht werden. Bei der syntaktischen Interoperabilität handelt es sich um Datenstrukturen und Formate. Standardisierungsgremien wie Open Geospatial Consortium (OGC) haben sich dieser Problematik angenommen und mit Standards wie z.B. WMS, WFS, WCS dieses Problem weitestgehend gelöst. Anders sieht es bei der semantischen Interoperabilität aus. Hierbei geht es um die Bedeutung der Informationen (Inhalte, Raum, Zeit). Heterogene Datensätze können nur dann ausgetauscht oder integriert werden, wenn sie vergleichbar sind. An diesem Punkt der „Vergleichbarmachung“ von Objektarten setzt die Interoperabilitätsanalyse an.

Der methodische Ablauf der Interoperabilitätsanalyse innerhalb des DeCOVER-Projektes besteht in einem mehrstufigen Verfahren. Im ersten Schritt wurde eine Analyse der Interoperabilität zwischen bestehenden Katalogen durchgeführt. Hier geht es ausschließlich um die Definitionsebene aus den Objektartenbeschreibungen. Als Kataloge werden ATKIS, CLC, BNTK von Sachsen-Anhalt und GSE Land M2.1 berücksichtigt. Folgende Schritte wurden durchgeführt: (i) auf Basis der bestehenden Kataloge wurden alle erforderlichen Eigenschaften extrahiert, (ii) die Eigenschaften wurden zu einem Basisvokabular zusammengefasst, (iii) alle Objektarten wurden mit Applikationsontologien, basierend auf dem Basisvokabular, beschrieben, (iv) die Applikationsontologien wurden analysiert und darauf aufbauend der DeCOVER-Ausgangsvorschlag beschrieben.

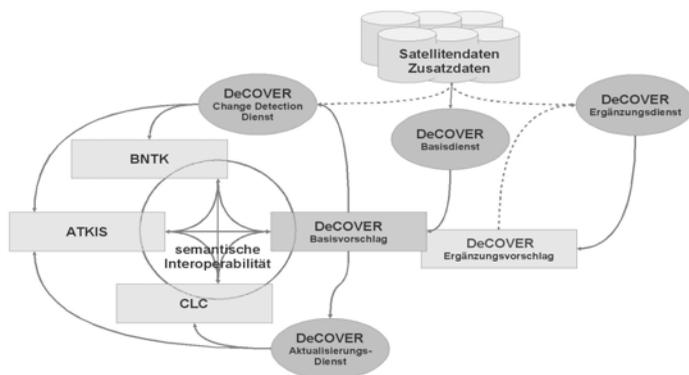


Abb.1: Interoperabilität im Projekt DeCOVER

Die Verwendung eines gemeinsamen Basisvokabulars ermöglicht die Vergleichbarmachung der Objektarten miteinander. Die im DeCOVER-Ausgangsvorschlag enthaltenen DeCOVER - Objektarten ermöglichen die Unterstützung der bestehenden Objektarten von CLC, BNTK und flächenhaften ATKIS-Objektarten.

3 Ontologien als Lösungsansatz

Eine Ontologie ist die explizite Beschreibung einer gemeinsamen ‚Weltansicht‘ (nach Gruber). Dabei weisen Ontologien folgende Charakteristiken auf: (i) Beschreibung von Konzepten (Begriffen), (ii) Verwendung von Taxonomien (Hierarchiebaum), (iii) Verwendung von Regeln, (iv) Verwendung von Kardinalitäten. Damit stellt die Verwendung von Ontologien einen Schritt in Richtung semantischer Interoperabilität dar. Die extrahierten Informationen können in einem Wissensmodell dargestellt und durch Beschreibungslogiken in Ontologien formalisiert werden. Der Mehrwert dieses Ansatzes im Vergleich zu herkömmlichen Datenbanken liegt in dem Einsatz von Inferenzmaschinen (reasoner), mit deren Hilfe ein automatischer und logischer Vergleich von Objektarten hergestellt werden kann. Darüber hinaus kann eine beliebige eigenschaftsbasierte Abfrage gestellt werden, z.B. die Anfrage nach Objektarten, die ausschließlich Gehölz als Hauptbestand haben. Speziellere Hauptbestände (Laubholz oder Nadelholz) werden automatisch mit berücksichtigt, da der gesamte Hierarchiebaum abgebildet wird. Dadurch kann von einer Ausgangs-Objektart, als Teil einer Anfrage, auf identische, speziellere und allgemeinere Objektarten geschlossen werden. Für die Erstellung von Ontologien wird ein Basisvokabular erarbeitet und darauf aufbauend werden Applikationsontologien (Beschreibung der einzelnen Objektarten) angeknüpft. Das Basisvokabular kann zielgerichtet erweitert werden, so dass Informationen als Applikationsontologien in beliebiger Anzahl hinzugefügt werden können. Letztendlich wird die Möglichkeit gegeben, durch Ontologien ein generisches System aufzubauen, mit dem Beziehungen unterschiedlicher Wissensdomänen verwaltet und spezifischen, individuellen Anforderungen angepasst werden können.

3.1 Modellentwicklung

Als Basis für die Ontologien dient ein Wissensmodell. Für die Erstellung des Wissensmodells wurden Objektarten nach aussagekräftigen Eigenschaften analysiert. Bei den Eigenschaften handelt es sich sowohl um semantische als auch um objektartenspezifische geometrische Eigenschaften (wie z.B. die Breite eines Fließgewässers als Unterscheidung zwischen Fluss und Bach). Nach der Strukturierung der Eigenschafts-Sammlung wurde daraus ein Modell mit unterschiedlichen Relationen erzeugt. Das Modell unterliegt bereits einer iterativen Evaluierung für die Objektarten. Das Modell besteht aus Basisattributen, die für alle Objektarten relevant sind.

3.1.1 Domain-Level-Ontologie als Basisvokabular

Die Erstellung des Wissensmodells für die Objektartenbeschreibung dient auch beim Basisvokabular als Grundlage. Die Attribute und ihre Ausprägungen werden für das Basisvokabular in Konzepte und Rollen überführt. Es werden verschiedene Relationen zwischen den Konzepten angewandt, wie z.B. ‚hat-Relation‘ und ‚ist-Relation‘. Für das Wissensmodell werden Kardinalitäten, Attribute und Restriktionen ergänzt. Die hierarchische Ordnung der Konzepte mit Eltern-Kind-Beziehungen führt zur hierarchisch strukturierten Taxonomie.

3.1.2 Applikationsontologien

Für jede Objektart wird eine Applikationsontologie, die auf dem Basisvokabular basiert, erstellt. Damit werden für jede Objektart allgemeingültige Konzepte und Rollen vererbt. Dies bedeutet, dass z.B. die Objektart ATKIS-Heide auch aus mindestens einem Hauptbestand (der streng nach der tatsächlichen Landbedeckung zugeordnet wird), maximal 3 Nebenbeständen und mindestens 1 Geometrie-eigenschaft besteht. Darüber hinaus können auch die Basiselemente für die betreffende Objektart weiter eingeschränkt werden, wie z.B. bei der allgemeinen Objektart gibt es genau 1 Bedeckungskategorie; die Ausprägung kann nicht benannt werden. Die Objektart Grünland hat genau 1 Bedeckungskategorie und zwar Vegetation. Dazu könnte man auch sagen, dass die Basisstruktur jetzt mit Werten versehen wird. Dieses wird in den verwendeten Beschreibungslogiken mit sich genau abgrenzenden Restriktionen belegt.

4 Ergebnisse: Reasoning, Ähnlichkeit

4.1 Reasoning

Das Reasoning ist ein automatischer Prozess, der durch Redundanz- und Konsistenzprüfungen logische Schlußfolgerungen basierend auf dem Wissensmodell erlaubt. Der ontologiebasierte Ansatz führt beim Reasoning zur automatischen Subsumption, die Beschreibung des inhaltlichen Verhältnisses von Merkmalen, der Objektarten. Dies funktioniert sehr gut innerhalb eines Kataloges und innerhalb einer Objektklasse, da bei einem konsistenten Katalog eine Vererbung der Eigenschaften erfolgt. Beim Vergleich von Objektarten verschiedener Kataloge sieht das Ergebnis anders aus. Vermeintlich gleiche Objektarten stehen nicht auf einer Ebene und damit erfolgt keine Vermischung der Objektarten unterschiedlicher Kataloge bei der Subsumption (Abb. 1: Subsumption von Wald – Objektarten). Die Objektarten Wald' von BNTK, von CLC und von ATKIS weisen zunächst keinerlei Beziehung zueinander auf. Bei genauerer Betrachtung wird klar, dass dies daran liegt, dass die genannten Objektarten zwar eine gemeinsame Schnittmenge an Eigenschaften besitzen, aber nicht identisch sind (Tab. 1: Ermittlung der Schnittmenge der Wald-Objektarten).

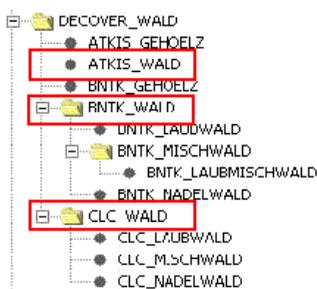


Abb. 1: Subsumption von Wald - Objektarten

Tabelle 1: Ermittlung der Schnittmenge der Wald-Objektarten

ATKIS Wald, Forst	CLC Wald	BNTK Wald	CLC- städtische Grünflächen
Flächenobjekt	Flächenobjekt	Flächenobjekt	Flächenobjekt
Hauptbestand: Gehölz, Sträucher	Hauptbestand: Gehölz	Hauptbestand: Gehölz	Hauptbestand: Vegetation
MFK: 0,1 ha	MFK: 25 ha	MFK: 2 ha	MFK: 25 ha
Nutzung: Forstwirtschaft		Nutzung: Forstwirtschaft	Nutzung: Freizeit
	Baumhöhe > 5 m		

4.2 Ähnlichkeit

Mit der Einführung des Ähnlichkeitsmaßes kann auch eine Abbildung zwischen nicht identischen Objektarten hergestellt werden, indem es den ‚herkömmlichen‘ Ontologie-Ansatz um einen Algorithmus zur Berechnung der Ähnlichkeit erweitert. Die Aussage über die Ähnlichkeit zwischen zwei Objektarten kann erst mal nur als Maß fungieren; eine Entscheidung, wie die Überführung der Objektarten vorgenommen wird, kann nicht abgeleitet werden. Dazu muss ein zusätzliches Regelwerk entwickelt werden. Die Regel könnte z.B. lauten: (i) Überführe die Ausgangsobjektart in die ähnlichste Objektart des Zielkataloges, (ii) Überführe die Ausgangsobjektart nur dann, wenn es eine Objektart mit mindestens 70 % Ähnlichkeit gibt, (iii) Gib die drei ähnlichsten Objektarten an und beachte weitere Gewichtungskriterien durch den Nutzer. Für die Berechnung eines Ähnlichkeitsmaßes gibt es im Wesentlichen drei unterschiedliche Ansätze:

- Netz Modell: Das Kriterium ist hierbei der Knotenabstand von zwei Eigenschaften
- Feature Modell: Das Kriterium ist die Anzahl der gemeinsamen Eigenschaften
- Geometrische Modell: Das Kriterium ist die Entfernung innerhalb eines n-dimensionalen Raumes (jede Eigenschaft wird an einer Achse aufgetragen)

Für die Eigenschaften unseres Modells kamen nur das Netz- oder Feature Modell in Frage, da es sich um stetige und *diskrete* Merkmale handelt, die sich beim geometrischen Modell kaum abbilden lassen. Diese beiden Modelle wurden getrennt und in Kombination in insgesamt 5 abgewandelten Ansätzen getestet. Für jeden Ansatz gab es einen festen Berechnungsalgorithmus, der zu vergleichbaren Ergebnissen führte. Die Ansätze unterscheiden sich dadurch, dass es sich um ein gerichtetes sowie ein ungerichtetes Ähnlichkeitsmaß handelt. Bei dem gerichteten Ähnlichkeitsmaß werden nur Eigenschaften des Zielobjektes berücksichtigt. Das ungerichtete Ähnlichkeitsmaß bestimmt die Ähnlichkeit zwischen zwei Objektarten. Damit erreicht z.B. der Ähnlichkeitswert nur noch 56 % beim Vergleich zwischen BNTK_Wald und BNTK_Laubmischwald, obwohl der Laubwald eine direkte Oberklasse des Laubmischwaldes in BNTK darstellt.

Die Kombination der ungerichteten Feature-Netz-Modell-Variante lieferte die besten Ergebnisse für eine Unterstützung in der Überführung von Ausgangsobjektarten in die passenden Zielobjektarten des anderen Objektartenkataloges. Diese Methode für die speziellen Landnut-

zungs-Anforderungen erscheint am sinnvollsten. Weitere Validierungen sind jedoch unerlässlich.

4.3 DeCOVER – Vorschlag

Die Ableitung des DeCOVER-Vorschlages erfolgte in einem mehrstufigen Prozess. Die Interoperabilitätsanalyse stellt die Grundlage dessen dar. Die aus der Interoperabilitätsanalyse resultierenden Ergebnisse wurden unterstützend für die Generierung der DeCOVER-Objektarten verwendet. Der vorerst abschließende Umsetzungsprozess für den DeCOVER-Vorschlag bildet die Harmonisierung zwischen Ergebnissen der Nutzeranforderungen und der Kosten-Nutzen-Analyse, die von anderen Projektpartnern durchgeführt wurden. Der DeCOVER-Vorschlag wurde nach den Ergebnissen in einen Basisdienst und spezifische Ergänzungsdienste gegliedert.

Das Fundament des DeCOVER-Vorschlages bilden die Objektartenkataloge CORINE Landcover (2000 national), ATKIS (OK 25, national), der Katalog der Biotop und Nutzungstypenkartierung BNTK von Sachsen Anhalt (1992) und GSE Land Regional Landcover M_2.1 (2005).

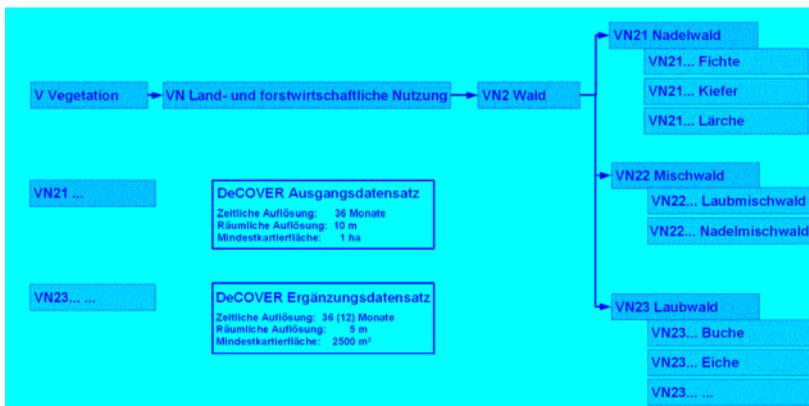


Abb. 2: Auszüge des DeCOVER-Ausgangs- und Ergänzungsdatsatzes

Das Ergebnis des DeCOVER-Vorschlages zeigt, dass durch die Zusammenführung der Eigenschaften die Beschreibung der DeCOVER-Objektarten ausführlicher und konsistenter ist als in den Ausgangskatalogen. Darüber hinaus besteht die technische Umsetzung des DeCOVER-Vorschlages in einer hierarchischen Form. Hier sind alle Eigenschaften einer Objektart enthalten und einheitlich gestaltet. Neben diesen Richtlinien wurde eine individuelle Betrachtung unter Berücksichtigung der nationalen Belange für jede Objektart vorgenommen. Nach der Zusammenstellung der Objektarten erfolgte eine manuelle Betrachtung und Bewertung der Anordnung. Anschließend wurden die in einer Gruppierung zusammengehörigen Eigenschaften nach allen auftretenden Eigenschaften nach o.g. beschriebenen Kriterien sowie zusätzlich individuellen Einschätzungen bewertet und daraus eine neue DeCOVER-Objektart festgelegt.

Die thematischen Informationen beschränken sich bislang auf die einfachen Objektattribute einer homogenen Nutzungs-/Bedeckungsart, wie sie auch bei Corine Land Cover in den Att-

ributtabelle enthalten sind. Inwieweit darüber hinaus noch weitere Attribute in der aktuellen Version des Ausgangsdatensatzes enthalten sein werden, hängt zum einen von der weiteren Ausgestaltung der Nomenklatur durch erweiterte Nutzeranforderungen und zum anderen von dem Austausch thematischer Informationen mit den DeCOVER-Ergänzungsdiensten ab.

5 Methodik zur Modellvalidierung

Um die inhaltliche und semantische Fehlerfreiheit der abgeleiteten DeCOVER-Objektarten zu garantieren, ist es notwendig, den DeCOVER-Vorschlag vollständig mit einer Modellvalidierung zu verankern. Als Instrument wurde eine Web Applikation basierend auf einer relationalen SQL-Datenbank entwickelt, welche eine manuelle Kontrolle unterstützt und gleichzeitig eine Validierung der gesamten Modellierung und Überführung durch die Fachanwender ermöglicht. Die Objektarten des DeCOVER-Vorschlages werden hier vollständig als Applikationsontologien umgesetzt, damit eine Darstellung des Überführungsprozesses richtungsunabhängig erfolgen kann. Die Applikation wird auf den DeCOVER Seiten den Nutzern zur Verfügung stehen. Das Hauptaugenmerk liegt in der Darstellung aller Objektarten, die mit ihren Eigenschaften gegenübergestellt und verglichen werden können. Das Ziel der Anwendung ist es, mit dem Nutzer das beschriebene Wissensmodell zu kommunizieren. Mit dieser Aufschlüsselung wie die Objektarten genau beschrieben worden sind, wird eine Grundlage geschaffen, die es ermöglicht, das Wissen der Fachanwender für das Wissensmodell generisch zu verwerten. Der Anwender erhält die Möglichkeit, die aufgestellten Eigenschaften zu bewerten, zu gewichten und ggf. auf Fehler in der Wissensbeschreibung hinzuweisen. Die Angaben der Referenznutzer können somit effektiv genutzt werden, um die Korrektheit des Wissensmodells für die Datenbank und die Ontologien zu überprüfen.

6 Literaturverzeichnis

- AdV-Arbeitsgruppe ATKIS, 2003: ATKIS-Objektartenkatalog Basis-DLM. URL: http://www.atkis.de/dstinfo/dstinfo2.dst_gliederung
- BERNARD, L., HAUBROCK, S., HÜBNER, S., LESSING, R., LUTZ, M. & VISSER, U. 2003: Semantic Interoperability by Means of Geoservices. In: Geotechnologien Science Report No. 2, pp. 1-16, ISSN 1619-7399, Potsdam.
- BOSSARD, M., FERANEC, H. & J. OTAHEL, 2000: The revised and supplemented Corine land cover nomenclature. Technical report No. 38 of European Environment Agency.
- DELPHI IMM GmbH, Eftas GmbH, Infoterra GmbH, 2006: DeCOVER Vorphase Schlussbericht. URL: decover.info
- CHRIST, I., HÜBNER, S. & LUTZ, M., 2004: Semantic Interoperability by Means of Geoservices. In: Zwischenbericht meanInGs 2004.
- LUTZ, M., CHRIST, I., WITTE, J., KLIEN, E. & HÜBNER, S. (2006): Overcoming Semantic Heterogeneity in Spatial Data Infrastructures. Computers and Geoscience (under review).
- PETERSON, J. & LANGNER U., 1992: Katalog der Biotoptypen und Nutzungstypen für die CIRluftbildgestützte Biotoptypen- und Nutzungstypenkartierung im Land Sachsen-Anhalt.
- WACHE, H., 2003: Semantische Mediation für heterogene Informationsquellen. Akademische VERLAGSGESELLSCHAFT AKA GMBH, DISSERTATIONEN ZUR KÜNSTLICHEN INTELLIGENZ, BERLIN.

Untersuchung der Skalenabhängigkeit der Textur im urbanen Raum mit Quickbird Daten

CHRISTIAN THIEL, TANJA RIEDEL & CHRISTIANE SCHMULLIUS

Zusammenfassung: Die Bildtextur spielt für die Detektion von Siedlungsflächen bei SAR-Daten als auch bei optischen Aufnahmen eine entscheidende Rolle. Bei SAR-Daten resultiert die Bildtextur in Siedlungsbereichen aus den unterschiedlichen geometrischen und dielektrischen Eigenschaften der Einzelstreuer. Bei optischen Daten ist die Variabilität der Reflexionseigenschaften der einzelnen Objekte bzw. Materialien das entscheidende Kriterium. Dielektrische Eigenschaften spielen hier keine Rolle. Von Bedeutung sind hier die Verwendung verschiedener Baustoffe, die Einstreuung von Vegetationsflächen oder die Wirkung von beleuchteten- und Schattenarealen. Allgemein betrachtet ergibt sich die Textur aus der Anordnung verschiedener Landbedeckungsarten auf engem Raum.

Die Frage unabhängig vom Typ der Daten lautet: In welcher Skala besitzt die Textur der Landoberfläche die höchste Aussagekraft für die Ausweisung von Siedlungsflächen? Wird eine Landschaft beispielsweise in einem äußerst detaillierten Maßstab betrachtet (Luftbild: Auflösung im Zentimeterbereich) werden Bildobjekte aufgelöst, die für die Differenzierung zwischen Siedlung und Nicht-Siedlung hinderlich sind. Werden beispielsweise einzelne Pflanzen (oder andere kleinräumige Feldinhomogenitäten) einer ackerbaulich genutzten Fläche aufgelöst, wirkt diese Fläche schließlich inhomogen und besitzt eine hohe Varianz. Im Gegensatz dazu erscheinen Siedlungsflächen mit geringer Varianz, da die einzelnen künstlichen Objekte wie Häuser, Plätze, Straßen in diesem Maßstab in sich homogen sind. Lediglich an Objektkanten sind gegebenenfalls große Grauwertunterschiede zu finden.

Werden grob aufgelöste Daten verwendet (MERIS, ASAR WS, MODIS) befindet sich eine Vielzahl unterschiedlicher Bildobjekte innerhalb einer Auflösungszelle (Pixel). Jene Objekte, die die typische Textur einer Siedlung ausmachen, werden nicht aufgelöst. Eine texturbasierte Siedlungsdetektion ist in diesem Fall ausgeschlossen. Die ideale Skala für eine siedlungsorientierte Texturanalyse muss demnach zwischen beiden beschriebenen Maßstäben liegen.

In dieser experimentellen Studie wird eine hoch aufgelöste optische Szene (Quickbird) stufenweise degradiert. Die Pixelgröße variiert zwischen $2,4 \text{ m} \times 2,4 \text{ m}$ (Originalauflösung) und $31,2 \text{ m} \times 31,2 \text{ m}$ (maximal Degradierung). In jeder Degradierungsstufe wurde eine Reihe verschiedener Texturparameter (erster und zweiter Ordnung) für unterschiedliche Siedlungsareale (verschiedene Nutzungstypen) sowie weitere Landbedeckungsformen berechnet. Die flächenhafte Ausdehnung des Texturfensters wurde jedoch konstant ($93,6 \text{ m} \times 93,6 \text{ m}$) gehalten. Die verschiedenen spektralen Kanäle des Quickbird wurden separat behandelt. So kann ebenfalls die Eignung des jeweiligen Kanals für die texturbasierte Klassifikation untersucht werden.

Eines der Hauptergebnisse dieser Untersuchung ist, dass die geometrische Auflösung maßgeblich die Texturinformation bestimmt. In der untersuchten Spannweite für die geometrische Auflösung reicht die texturbasierte Klassentrennbarkeit von exzellent bis nicht existent. Für eine Reihe von Texturparametern und Landbedeckungsklassen konnte ein kontinuierlicher Zusammenhang zwischen Bilddegradierung und Texturwert nachgewiesen werden. Bei anderen Parametern hingegen stellten sich Diskontinuitäten heraus. Mit anderen Worten: bis zu einem bestimmten Punkt führte eine Bilddegradierung zu einer Texturminderung. Ab diesem Punkt resultierte eine weitere Degradierung in keiner weiteren signifikanten Texturreduzierung.

1 Einführung

1.1 Projekthintergrund

Die vorgestellte Analyse wurde im Rahmen des DLR/BMBF Projektes ENVILAND durchgeführt. Das übergeordnete Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung von Methoden zur integrativen Nutzung von SAR und optischen Instrumenten zur Erdbeobachtung. Dabei wird sich auf Anwendungen für Landoberflächenthemen konzentriert. ENVILAND verwendet vor allem die Daten der beiden Instrumente ASAR und MERIS des europäischen Umweltsatelliten ENVISAT. Neben den ENVISAT Instrumenten werden in zweiter Linie auch Daten anderer Erdbeobachtungsmissionen - wie Landsat, Ikonos, Quickbird und ERS1/2 - verwendet. Ebenfalls einbezogen werden vorhandene Flugzeug gestützte E-SAR Daten. Diese Daten simulieren in guter Näherung die Qualität der zukünftigen deutschen Radar Satellitenmission TerraSAR-X, die einen wesentlichen Schwerpunkt für die längerfristige Verwertung der Ergebnisse dieses Vorhabens darstellt. Das Teilvorhaben Skalenintegration – ein von der Universität Jena betreutes Teilprojekt von ENVILAND – beinhaltet die Analyse des Skaleneinflusses auf den Informationsgehalt der Fernerkundungsdaten. Von besonderem Interesse ist dabei der Zusammenhang zwischen geometrischer Auflösung und Texturausprägung.

1.2 Skaleneinfluss auf die Bildtextur

Die geometrische Auflösung von Fernerkundungsdaten ist von der Wahl des jeweiligen Sensors bzw. Produktes abhängig. Während die Kantenlänge einer Auflösungszelle bei hochaufgelösten Daten (z.B. Quickbird) etwa einen Meter beträgt, umfasst ein Bildelement eines Sensors mit geringer geometrischer Auflösung (z.B. MODIS, MERIS) mehrere Hektar Landoberfläche. Entsprechend verschieden detailliert sind die in den Bilddaten enthaltenen Informationen.

Hochaufgelöste Daten können Einzelobjekte wie Bäume, Häuser oder infrastrukturelle Einrichtungen auflösen (H-resolution nach STRAHLER et al. 1986). Je nach Art und Anordnung der Einzelobjekte ergibt sich eine dem Land Cover entsprechende Textur. Bei Sensoren mit geringer geometrischer Auflösung liegt die spektrale Information der genannten einzelnen Objekte als Mischinformation innerhalb eines Bildelements vor (L-resolution nach STRAHLER et al. 1986). Durch die Mischung der Spektralinformation mehrerer Objekte entstehen neue Mischsignaturen. Die Texturinformation, wie sie bei hochaufgelösten Fernerkundungsdaten vorhanden ist, steht in dieser Skala nicht zur Verfügung. Die Frage lautet: In welcher Skala besitzt die Textur der Landoberfläche die höchste Aussagekraft für die Ausweisung von Siedlungsflächen? Wird eine Landschaft beispielsweise in einem äußerst detaillierten Maßstab betrachtet (Luftbild: Auflösung im Zentimeterbereich) werden Bildobjekte aufgelöst, die für die Differenzierung zwischen Siedlung und Nicht-Siedlung hinderlich sind. Werden beispielsweise einzelne Pflanzen (oder andere kleinräumige Feldinhomogenitäten) einer ackerbaulich genutzten Fläche aufgelöst, wirkt diese Fläche schließlich inhomogen und besitzt eine hohe Varianz. Im Gegensatz dazu erscheinen Siedlungsflächen mit geringer Varianz, da die einzelnen künstlichen Objekte wie Häuser, Plätze, Straßen in diesem Maßstab in sich homogen sind. Lediglich an Objektkanten sind gegebenenfalls große Grauwertunterschiede zu finden. Werden grob aufgelöste Daten verwendet (MERIS, ASAR WS, MODIS) befindet sich eine Vielzahl unterschiedlicher Bildobjekte innerhalb einer Auflösungszelle. Jene Objekte, die die typische Textur einer Siedlung ausmachen, werden nicht aufgelöst. Eine texturbasierte Siedlungsdetektion ist in diesem Fall ausgeschlossen. Die ideale Skala für eine siedlungsori-

enterte Texturanalyse muss folglich zwischen beiden beschriebenen Maßstäben liegen (vgl. STEINNOCHER 1997).

1.3 Untersuchungsgebiet und Fernerkundungsdaten

1.3.1 Untersuchungsgebiet Erfurt

Für das Teilvorhaben „ENVILAND Skalenintegration“ wurde die Thüringer Landeshauptstadt Erfurt als Testgebiet gewählt (Abb. 1). Erfurt liegt im südlichen Randbereich des Thüringer Beckens. Die Stadt erlebte durch den Rollenwandel zur Landeshauptstadt und den allgemeinen Strukturwandel der Wirtschaft in den neuen Bundesländern einen tief greifenden Wandlungsprozess. Aus einer Stadt mit überwiegend produzierendem Gewerbe ist in relativ kurzer Zeit eine Stadt mit Mischstrukturen geworden.



Abb. 1: Quickbird-Aufnahme von Erfurt (26.05.2005, Echtfarbdarstellung)

Die Infrastruktur Erfurts wird bzw. wurde in den letzten Jahren ausgebaut, z.B. ICE-Knotenpunkt, Güterverkehrszentrum und internationaler Regionalflughafen. Seit 1988 haben sich Industrie- und Gewerbegebietsflächen nahezu verdoppelt. Wohngebiete sind und waren nach der Wiedervereinigung ebenfalls durch starke Flächenzuwächse gekennzeichnet. Das Untersuchungsgebiet ist durch typische urbane Strukturen wie geschlossene städtische Bebauung, Industrie- und Gewerbeflächen, Wohnblockbebauung, lockere ungeschlossene Wohnbebauung sowie städtische Grünflächen charakterisiert und bietet somit eine ideales

Testgebiet zur Kartierung urbaner Strukturen sowie deren Veränderungen auf unterschiedlichen Maßstabsebenen.

1.3.2 Fernerkundungsdaten und Testgebiete

Die Quickbird-Szene Erfurt wurde am 26. Mai 2005 aufgenommen. Neben den vier spektralen Kanälen steht ebenfalls die geometrisch hoch aufgelöste Information des PAN Kanals zur Verfügung. Aus der Quickbird-Szene wurde ein Subset, das alle relevanten Siedlungselemente bzw. -Typen beinhaltet. Innerhalb dieses Subsets wurden Testgebiete der verschiedenen relevanten Landbedeckungsklassen gewählt (siehe Abb. 2). Dies sind zwei Ackerlandflächen (1, 2), ein Gewerbegebiet mit sehr großen Hallen (3), ein weiteres Gewerbegebiet mit typischer Struktur (4), eine Kleingartenanlage (5 links), ein ländliches Einfamilienhaus-Neubaugebiet (5 rechts), der Erfurter Stadtkern (6) sowie ein städtisches Wohngebiet bestehend aus mehrstöckigen Wohnhäusern (7). Zudem wurde ein weiteres Subset kreiert, um zwei Waldflächen in die Untersuchung einbeziehen zu können. Die Erstellung von Subsets erfolgte mit dem Hintergrund der Ersparnis von Rechenzeit und Speicherplatz.



Abb. 2: Quickbird-Szene mit Texturtestgebieten

2 Methodik und Ergebnisse

2.1 Voruntersuchungen

In einer Voruntersuchung wurde die Eignung der verschiedenen spektralen Kanäle sowie unterschiedlicher Texturparameter für die texturbasierte Separierung der verschiedenen Siedlungsklassen analysiert. Hierzu wurde eine Reihe Texturparameter (Mittlere Euklidische Distanz, Varianz, Schiefe, Datenstreuung, GLDV Entropie, GLDV Kontrast, GLDV Korrelation (HARALICK et al. 1973), Schiefe, Standardabweichung) separat für die Spektralkanäle sowie für den PAN-Kanal berechnet. Außerdem wurde ein PAN-Kanal mit der geometrischen Auflösung der MS-Kanäle simuliert (und in die Analyse einbezogen), indem die Mittelwertberechnung aus allen MS-Kanälen erfolgte. Im Rahmen der Analyse wurde eine Filtergröße von 7×7 Pixel für die MS-Kanäle und 27×27 Pixel für den PAN-Kanal verwendet. Auf diese Weise wurde gewährleistet, dass das Filterfenster bei allen Kanälen in etwa dieselbe Fläche abdeckt und somit der Einfluss der höheren geometrischen Information des PAN-Kanals abgeschätzt werden kann.

Die folgende Abb. 3 repräsentiert eins der insgesamt neun Texturmaße (GLDV Entropie). Anhand der Abbildung wird deutlich, dass die verschiedenen urbanen bzw. agrarischen Nutzungen mit unterschiedlichen Textursignaturen einhergehen. Bebaute Areale einschließlich

Kleingärten sind anhand hoher Grauwerte, landwirtschaftliche Flächen anhand geringer Grauwerte erkennbar. Außerdem bestehen zwischen den einzelnen urbanen Nutzungen sowie zwischen den verschiedenen Texturparametern zum Teil erhebliche Unterschiede. Dies wird besonders an Gewerbeflächen mit sehr großen Hallen (Testgebiet 3) deutlich.



Abb. 3: Textur: GLDV Entropie aus blauem Kanal

Die visuellen Eindrücke werden nachfolgend (Abb. 4) durch konkrete klassenspezifische Texturwerte belegt. Für diesen Schritt wurden die oben beschriebenen Testgebiete (Abb. 2) der verschiedenen relevanten Landbedeckungsklassen gewählt. Aus den dargestellten Grafiken kann für jede Testfläche der Mittelwert des jeweiligen Texturparameters aufgelöst für jeden Kanal entnommen werden. Dargestellt sind die Texturmaße für die Kanäle Blau (blau), Grün (grün), Rot (rot), NIR (braun) und den Mittelwert (schwarz) sowie den PAN-Kanal (schwarz gestrichelt).

Von einer guten Trennbarkeit zwischen urbanen und nicht-urbanen Gebieten kann ausgegangen werden, wenn die Texturwerte für Acker im Verhältnis zu denen der anderen Klassen vergleichsweise gering sind. Dies trifft bei dem hier herausgegriffenen Texturmaß GLDV Entropie vor allem auf den blauen Kanal zu. Bei allen anderen Kanälen besitzt die Vegetation einen maßgeblichen Einfluss auf den Reflexionsgrad und somit auf die Textur. Dies führt zwar in der Regel zu einer Texturerhöhung in urbanen Gebieten, da diese größtenteils durch eine unregelmäßige und kleinräumliche Einstreuung von Vegetation gekennzeichnet sind. Allerdings wird auch die Textur landwirtschaftlich genutzter Areale derart erhöht, dass sich die Trennbarkeit von bebauten und unbebauten Gebieten reduziert. Eine Ausnahme hierbei bildet der Texturparameter GLDV Kontrast. Der Mittelwert der Spektralkanäle ist in diesem Falle die angebrachte Grundlage für die Texturberechnung.

Ein Vergleich zwischen den Texturwerten für den PAN-Kanal und dem Mittelwert der MS-Kanäle zeigt, dass offenbar die deutlich höhere geometrische Auflösung des PAN-Kanals nicht generell zu einer Verbesserung der Trennbarkeit von urbanen und nicht-urbanen Gebieten führt. Vielmehr ist zu beobachten, dass trotz höherer Auflösung die Zahlenwerte für die Texturparameter nicht generell höher sind als jene für den Mittelwert des MS-Kanals (z.B. GLDV Kontrast). Dies deutet darauf hin, dass die relevanten texturgebenden Objekte auch in den MS-Daten noch hinreichend aufgelöst werden.

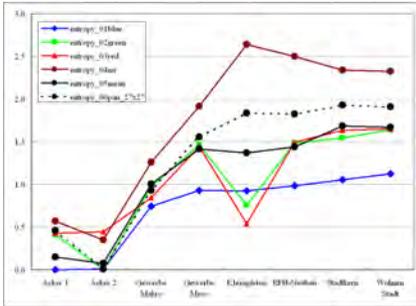


Abb. 4: Testflächenmittelwerte: GLDV Entropie

Die Voruntersuchung erbrachte die folgenden Ergebnisse. Geeignete Texturparameter sind GLDV Kontrast, Datenstrebweite, GLDV Entropie, Mittlere Euklidische Distanz, Standardabweichung und Varianz. Der blaue Kanal lässt bis auf eine Ausnahme die beste Trennbarkeit zwischen urbanen und nicht-urbanen Gebiet erwarten.

2.2 Geometrischen Degradierung

Mit zunehmender geometrischer Auflösung werden immer kleinere Bildobjekte aufgelöst. Inwieweit diese zusätzlichen Bildobjekte einer texturbasierten Siedlungsdetektion dienlich sind, gilt es zu klären. Es konnte oben gezeigt werden, dass die geometrische Auflösung von Quickbird ausreichend ist, um Siedlungsflächen texturbasiert zu erkennen. Die Fragen sind, wie sich 1.) eine Reduzierung der geometrischen Auflösung auf die Bildtextur auswirkt und 2.) ab welcher Degradierungsstufe entscheidende Bilddetails verloren gehen.

Um die originale Auflösung der Quickbird Daten zu reduzieren wurden schrittweise jeweils mehrere Pixel zu einem Pixel zusammengefasst. Dabei wird der Mittelwert aller zusammengefasster Pixel einem neuen Pixel zugewiesen, das genau die Fläche der zusammengefassten Pixel abdeckt. Dies stellt zwar ein recht einfaches Verfahren der Simulation geringer aufgelöster Daten dar. Dennoch ist davon auszugehen, dass anhand dieses Verfahrens optische Daten niedrigerer geometrischer Auflösung hinreichend simuliert werden können. Die Pixelgröße des blauen Kanals von 2,4 m Kantenlänge ist hier der Ausgangswert. In der degradierten Auflösung beträgt die Pixelkantenlänge je ein Vielfaches (z.B. 4,8; 7,2; 9,6 ... 31,2). Maximal wurde eine Kantenlänge von 31,2 m gewählt, um einem Landsat Pixel möglichst nahe zu kommen. Im Anschluss wurden sämtliche degradierte Bilder auf 2,4 m \times 2,4 m Pixelgröße resampelt (oversampling). Die Filterfenstergröße beträgt anschließend einheitlich 39 \times 39 Pixel. Durch dieses Verfahren wird gewährleistet, dass für jede Degradierungsstufe ein identisches Filterfenster verwendet werden kann und dass die durch dieses Fenster überdeckte Fläche jeweils deckungsgleich ist (93,6 m \times 93,6 m). Die recht große Fläche, die vom Filterfenster überdeckt wird ist notwendig, damit auch bei der höchsten Degradierungsstufe (Pixelkantenlänge von 31,2 m) noch mindestens 9 Pixel innerhalb eines Filterfensters erscheinen.

In dieser Untersuchung wurde ausschließlich der blaue Kanal verwendet. Die Berechnung der Textur erfolgte nur für die Parameter *Data Range*, Varianz und GLDV Entropie. Der Ausschnitt der Quickbird-Szene wurde Richtung Süden etwas erweitert, um Teile des südlich an Erfurt angrenzenden Waldgebietes (überwiegend Laubwald) mit abzudecken. Die Waldtextur wird anhand zweier Testgebiete ebenfalls untersucht.

Abb. 5 (links) zeigt die berechnete Textur für den Parameter *Data Range* für die Originalauflösung (2,4 m). Deutlich zu erkennen sind die hohen Texturwerte für bebaute Areale. Auch die Kleingartenanlage ist sichtbar. Die Waldflächen im Süden des Stadtkerns sowie die Ackerflächen weisen geringe Grauwerte auf. Durch das große Filterfenster sind Verwischungseffekte erkennbar. Einzelne Siedlungselemente lassen sich kaum identifizieren. Im Vergleich zur Originalauflösung (Abb. 5, links) ist der Kontrast bei der höchsten Degradierung (Abb. 5, rechts) zwischen bebauten und unbebauten Flächen bis auf einige Hot Spots deutlich geringer ausgeprägt.

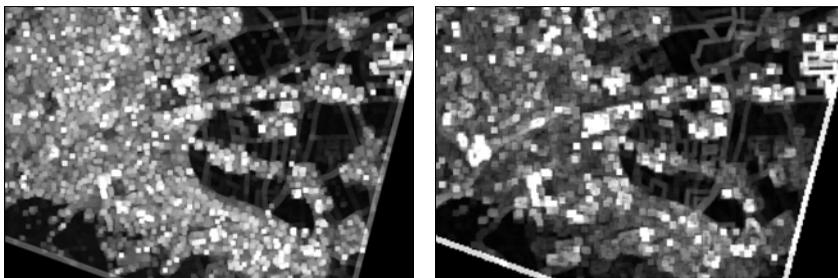


Abb. 5: *Data Range* bei Degradierung 2,4 m (links) und 31,2 m (rechts)

2.3 Geometrische Auflösung und Textur

Im unten stehenden Diagramm sind die gemessenen Texturwerte für alle Degradierungsstufen und Testflächen aufgetragen. Acker- und Waldflächen besitzen die geringste Textur, Gewerbeparks und das städtische Wohngebiet (große Wohnblocks) stehen für die größten Texturwerte. Im mittleren Bereich liegen Kleingartenanlagen, der Stadtkern und ländliche Wohngebiete. Deutlich zu erkennen ist die Texturabnahme mit Erhöhung der Degradierung. Dieser Effekt ist für nahezu für alle Testflächen, wenn auch unterschiedlich stark ausgeprägt, festzustellen.

Auf die Textur von Ackerflächen hat die geometrische Auflösung einen sehr geringen Einfluss. Bei Waldflächen ist der Einfluss ebenfalls gering, wobei sich die Texturwerte den ersten zwei bis drei Degradierungsstufen unterscheiden. Dies lässt sich mit der Größe des Kronendurchmessers der Bäume im Wald erklären. Mit hochaufgelösten Daten ist es möglich, einzelne Bäume zu detektieren. Durch die Auflösung der einzelnen Bäume und der damit verbundenen Grauwertunterschiede wird eine Textur größer Null erzeugt. Reduziert sich die Auflösung, werden mehrere Bäume in einem Pixel zusammengefasst, Grauwertunterschiede und Textur gehen zurück. In dieser Untersuchung setzt dieser Effekt etwa in der dritten Degradierungsstufe (9,6 m Pixelkantenlänge) ein. Eine weitere Degradierung führt kaum noch zu einer Texturminderung.

Ein deutlicher Zusammenhang zwischen geometrischer Auflösung und Textur lässt sich für Kleingärten bis zur 5. Degradierungsstufe (12 m Pixelkantenlänge) feststellen. Vor allem zwischen den ersten Degradierungsstufen sind immense Textursprünge nachzuweisen. Eine weitere Degradierung hat nur noch einen vergleichsweise geringen Effekt. Niedrige geometrische Auflösungen verhindern demnach eine texturbasierte Detektion dieser Landbedeckungsklasse. Bei einer Pixelkantenlänge kleiner 12 m werden die texturgebenden Objekte nicht mehr aufgelöst. Ein ähnlicher Zusammenhang, wenn auch nicht so deutlich ausgeprägt,

kann bei ländlichen Siedlungen (EFH-Neubau) festgestellt werden. Die texturgebenden Objekte besitzen demnach ähnliche Dimensionen wie bei Kleingärten. Jedoch bleibt auch bei geringen geometrischen Auflösungen eine Resttextur erhalten.

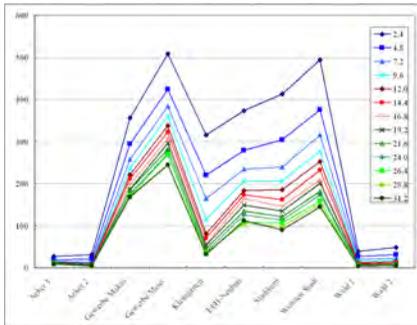


Abb. 6: Testflächenmittelwerte: *Data Range*

Dem gleichen Prinzip folgen die restlichen Testflächen: die ersten Degradierungsstufen ziehen eine stärkere Texturminderung nach sich als die letzten. Ab einem Schwellenwert von ca. 10 m wirkt sich eine weitere geometrische Degradierung nicht mehr so deutlich aus. Diese Tatsache wird durch Abb. 7 unterstrichen. Die Diagramme stellen die Beziehung zwischen Reduzierung der geometrischen Auflösung und Texturrückgang heraus. Es ist klar ersichtlich, dass ab einer Degradierung auf 14,4 m (Stufe 5-6) Pixelkantenlänge kaum noch ein weiterer Texturrückgang erfolgt. Für die Varianz stellt sich die Sachlage sehr ähnlich dar. Bei der GLDV Entropie kann ein solcher Schwellenwert nicht erkannt werden.

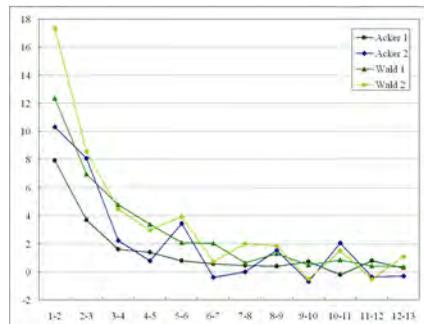
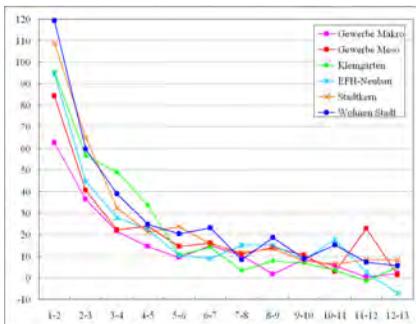


Abb. 7: Änderung der *Data Range* mit zunehmender Degradierung; 1-2 entspricht der Änderung der Pixelgröße von 2,4 m auf 4,8 m, 12-13 entspricht der Änderung der Pixelgröße von 28,8 m auf 31,2 m

4 Zusammenfassung und Diskussion

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde zunächst die Eignung unterschiedlicher Texturparameter für die Unterscheidung der verschiedenen Siedlungsareale sowie für die Trennung von Siedlung / Nicht-Siedlung geprüft. Dabei stellten sich die Parameter GLDV Kontrast, Datenstreuung (*Data Range*), GLDV Entropie, Mittlere Euklidische Distanz und Varianz als be-

sonders geeignet heraus. Außerdem konnte deutlich gemacht werden, dass der blaue Kanal für eine texturbasierte Trennung von Siedlung / Nicht-Siedlung zu bevorzugen ist.

Das Hauptaugenmerk der Untersuchung lag auf der Beantwortung der Frage bei welcher Auflösung die Textur der Landoberfläche die höchste Aussagekraft für die Ausweisung von Siedlungsflächen besitzt. Hierfür wurde die geometrische Auflösung der Originaldaten schrittweise reduziert. Anhand der degradierten Daten erfolgte im Anschluss die Berechnung verschiedener Texturparameter. Für eine Reihe von Texturparametern und Landbedeckungsklassen konnte ein kontinuierlicher Zusammenhang zwischen Bilddegradierung und Texturwert nachgewiesen werden. Dieser Zusammenhang variiert in seiner Ausprägung in Abhängigkeit von der Landbedeckungsklasse. Bis zu einem bestimmten Punkt führte eine Bilddegradierung zu einer Texturminderung. Ab diesem Punkt resultierte eine weitere Degradierung in keiner weiteren signifikanten Texturreduzierung. Diese Situation tritt bei einer geometrischen Auflösung von ca. 10-15 m (in Abhängigkeit der Landbedeckungsklasse) ein. Hier konnte somit ein Skalensprung nachgewiesen werden.

Die Frage nach der idealen Auflösung für die texturbasierte Siedlungserkennung ist allerdings nicht pauschal zu beantworten. Um beispielsweise die urbane Klasse „Kleingärten“ sicher von Wald oder Ackerland trennen zu können, muss eine möglichst hohe Auflösung nahe der Originalauflösung gewählt werden. Urbane Klassen mit großräumiger Heterogenität wie Gewerbeflächen kommen mit einer geringeren Auflösung in der Größenordnung von 30 m aus. Gleiches gilt für die texturbasierte Trennung verschiedener Siedlungsklassen. Je nach geometrischer Auflösung lassen sich andere Siedlungsklassen voneinander separieren. Folglich ist ein multiskaliger Ansatz für die Ausweisung differenzierter urbaner Klassen anzustreben (vgl. HAY et al. 1997).

5 Literaturverzeichnis

- HARALICK, R.M., SHANMUGAN, K. & DINSTEN, I., 1973: Textural Features for Image Classification.-IEEE Tr. on Systems, Man, and Cybernetics SMC-3 (6), S. 610-621.
- HAY, G.J., NIEMANN, K.O. & GOODENOUGH, D.G., 1997: Spatial Thresholds, Image Objects, and Upscaling: A Multiscale Evaluation.-Remote Sen. Environ. 62, S. 1-19.
- STEINACHER, K., 1997: Texturanalyse zur Detektion von Siedlungsgebieten in hochauflösenden panchromatischen Satellitenbilddaten.-Beiträge zur AGIT 1997, SGM26: S.143-152.
- STRAHLER, A.H., WOODCOCK, C.E. & SMITH, J.A., 1986: On the nature of models in remote sensing.-Remote Sens. Environ. 20: S. 121-139.

Ein multi-temporaler Klassifikationsansatz zur Erfassung der Landbedeckung mit RapidEye Satellitenbilddaten

HORST WEICHEL, URS SCHULTHESS, STEFANIE GRUNDNER, CHRISTIAN STEIN, KLAUS SCHELLING, ERIKA HÖBER, VERENA GRÜNER, FREDERIK JUNG-ROTHENHÄUSLER¹

Zusammenfassung: Das neue satellitenbasierte Fernerkundungssystem von RapidEye besteht aus fünf unabhängigen Satelliten in ca. 620 km Höhe, die alle mit jeweils einem identischen Multispektralsensor MSI (Multi-Spectral Imager) ausgerüstet sind. Die Konstellation der Satelliten in Verbindung mit ihrer Umlaufbahn ist so gewählt, dass prinzipiell jeder Punkt der Erdoberfläche täglich aufgenommen werden kann. Das RapidEye Satellitensystem wird im ersten Halbjahr 2007 gestartet und ab dem 2. Halbjahr 2007 operationell Daten liefern. Regelmäßige Kalibrierungszyklen werden die Vergleichbarkeit und Homogenität der Daten unabhängig vom Aufnahmezeitpunkt und vom jeweils benutzten MSI sichern.

Die RapidEye AG ist gegenwärtig dabei, Konzepte und Produkte für die Erfassung und Analyse der Landbedeckung auf der Basis dieser neuen Daten zu entwickeln. Das dazu konzipierte objekt-basierte Klassifikationschema basiert auf einem hierarchischen Ansatz, der in der ersten Hierarchieebene generalisierte Klassen erzeugt. Zur Unterscheidung der Klassen werden spektrale Objekteigenschaften gemeinsam mit geometrischen und Texturmerkmalen genutzt. Zur Trennung der detaillierteren Klassen auf den folgenden Klassifikationsebenen werden multi-temporale Datensätze mit sehr kurzen Aufnahmezeitintervallen genutzt. Dies ermöglicht die Rekonstruktion der Wachstumskurven von Vegetation für solche detaillierteren Klassifikationen sowie weiterführende Analysen. Durch die Kombination von hoher zeitlicher und hoher geometrischer Bodenauflösung wird eine Verbesserung der thematischen Tiefe, der Trennungsschärfe und der Klassifizierungsgenauigkeit erreicht.

1 Einleitung

Die Entwicklung der satellitengestützten Fernerkundung in den letzten Jahren war gekennzeichnet durch den Einsatz neuer Sensorsysteme mit immer höheren Bodenaufösungen, die gegenwärtig bereits deutlich die Marke von einem Meter unterschritten haben. Diese überwiegend bereits kommerziell betriebenen Satelliten liefern damit Bilddaten, die in traditionelle Anwendungsbereiche der flugzeuggestützten Luftbilderfassung vordringen.

Trotz dieser technologischen Erfolge auf dem Gebiet der Bildauflösung stößt die Nutzung von satellitengestützten Fernerkundungstechnologien für eine ganze Reihe von potentiellen Anwendungsgebieten immer noch an systembedingte Grenzen. Dies kann insbesondere überall dort beobachtet werden, wo die Bilddaten zu einem definierten Zeitpunkt, mit einer sehr hohen zeitlichen Wiederholrate oder mit einer hohen Aufnahmegarantie gewonnen werden müssen.

Eine hohe Wiederholrate wird dabei insbesondere für multi-temporale Auswertungen auf der Grundlage von Vegetationswachstumsmodellen für viele Anwendungen in der Land- und Forstwirtschaft, für Monitoringanwendungen, bei ökologischen Fragestellungen, aber auch für detaillierte Landnutzungserfassungen benötigt.

¹ RapidEye AG, Molkenmarkt 30, 14776 Brandenburg a.d. Havel, Tel.: (49) 3381-8904-0, Fax: (49) 3381-8904-101, e-mail: info@rapideye.de, web: www.rapideye.de

Eine weitgehende Garantie für die Datenbereitstellung verlangen insbesondere alle Aufgaben, die im Zusammenhang mit zeitkritischen Anwendungen, mit der Erfüllung gesetzlicher und normativer Pflichten sowie mit Aufgaben im Katastrophen- und Gefahrenschutz verbunden sind. Da die Bildaufnahmemöglichkeit für optisch/infrarote Satellitensensoren durch die Wolkenbedeckung bestimmt wird, kann auch hier eine Erhöhung der Aufnahmewahrscheinlichkeit nur durch eine Verringerung des zeitlichen Abstandes zwischen zwei Überflügen eines Gebietes erreicht werden.

Es zeigt sich somit immer deutlicher, dass gegenwärtig der zeitliche Aspekt bei der Datengewinnung und die damit verbundene Sicherheit bzw. Wahrscheinlichkeit der Bildaufnahme in einem definierten Zeitintervall für die Akzeptanz und Nutzung von Fernerkundungsmethoden eine große Bedeutung gewinnt.

2 Das RapidEye Satellitensystem

Aus den in der Einleitung dargelegten Überlegungen heraus entstand das RapidEye-Konzept für ein neues innovatives Fernerkundungssystem. Kernpunkt dieses neuen Konzeptes war die Forderung nach einer hohen geometrischen Auflösung in Kombination mit einer hohen zeitlichen Wiederholrate bei gleichzeitig möglichst großer täglicher Flächenabdeckung. Prinzipiell sollte die Möglichkeit bestehen, jeden Punkt der Erdoberfläche täglich durch einen der RapidEye Satellitensensoren mit einer Bodenaufklärung von 6-7 m aufzunehmen, und gleichzeitig eine ausreichend Gesamtkapazität des Systems für eine wöchentliche bzw. mindestens 14-tägige Wiederholung der Bildaufnahme über große zusammenhängende Gebiete zu erreichen.

Konzeptionelle Studien zeigten, dass ein solches System mit insgesamt 5 in einer nahezu polaren Umlaufbahn stationierten Satelliten realisierbar ist (Abbildung 1). Alle 5 Satelliten fliegen dabei auf einer identischen Umlaufbahn mit 72° Winkelabstand. Die Bahnhöhe liegt bei ca. 622 km, die Inklination der Bahn beträgt 97° . Die lokale Überflugzeit am Äquator liegt bei ca. 11:00 Uhr mit jahreszeitlich bedingten Änderungen von \pm ca. 30 min. Auf Grund der Erdrotation beträgt der Abstand der Nadirpunkte zweier aufeinanderfolgender Satelliten in Ost-West – Richtung am Äquator ca. 540 km. Pro Tag (24 Stunden) absolviert jeder der 5 Satelliten 15 Erdumkreisungen.

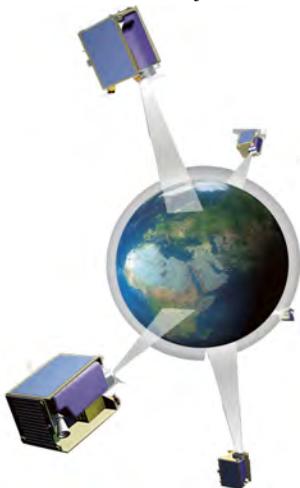


Abb. 1: Konstellation der RapidEye Satelliten

Die Satelliten werden von der britischen Firma SST Surrey Satellite Technology entwickelt und gebaut, während die Entwicklung und Herstellung der digitale Multispektralkamera MSI bei Jena Optronik in Thüringen erfolgt. Jeder dieser Satelliten ist mit einer identischen digitalen Kamera, dem MSI (Multi-Spectral Imager), ausgerüstet (Abbildung 2). Diese Kameras arbeiten nach dem Prinzip eines multispektralen Pushbroom-Scanners mit 5 Sensorzeilen, die jeweils 12.000 CCD-Elemente enthalten. Jede Sensorzeile nimmt dabei die Strahlungsinformationen in einem festgelegten Spektralkanal auf, von denen drei im optischen

Bereich (blau – grün – rot) und zwei im nahen Infrarot („Red Edge“, NIR) liegen. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der Spektralkanäle und der entsprechenden Wellenlängen.

Tabelle 1: Spektralkanäle des MSI

Kanal	Wellenlänge (nm)
1	440 - 510
2	520 - 590
3	630 - 685
4	690 - 730
5	760 - 850

Die Optik des MSI ist so ausgelegt, dass eine Schwadbreite des Bildstreifens von 77,25 km erreicht wird. Damit ergibt sich eine nominelle Bodenauflösung (Ground Sampling Distance) von 6.5 m. Der im Satelliten

integrierte Bilddatenspeicher hat eine Kapazität von ca. 1.500 km Bildstreifenlänge

bei Aufnahme aller 5 Spektralbänder. Somit können pro Orbit ca. 115.875 km² der Erdoberfläche in voller Auflösung unkomprimiert aufgenommen werden. Für alle 5 Satelliten zusammen ergibt sich damit bei 15 Orbits pro Tag, von denen etwa 10 über Landoberflächen verlaufen, eine tägliche Aufnahmekapazität zwischen 4 und 6 Millionen Quadratkilometer. Diese Fläche lässt sich nochmals fast verdoppeln, wenn die Anzahl der aufgenommenen Spektralkanäle reduziert oder die radiometrische bzw. geometrische Auflösung verringert wird. Diese Optionen können vom Boden aus gesteuert werden.

Zusätzlich verfügen alle Satelliten über ein System zur Lageveränderung, mit dem sich die Blickrichtung der Kamera quer zur Flugrichtung verändern lässt. Durch diese Möglichkeit erhöht sich die Flexibilität des Satellitensystems beträchtlich. Erstens ergibt sich daraus die Möglichkeit, potentiell jeden Punkt der Erdoberfläche täglich mit einem der Satelliten zu erreichen bzw. aufzunehmen. Insbesondere für Gebiete mit einer hohen Bewölkungswahrscheinlichkeit kann so die Chance zur Gewinnung einer wolkenfreien Aufnahme drastisch erhöht werden, da jede mögliche Wolkenlücke an einem beliebigen Tag zur Überflugzeit genutzt werden kann. Dazu wird bei der täglich zweimal erfolgenden Programmierung der Satelliten eine aktuelle Wolkenprognose einbezogen.

Mit der damit verfügbaren Aufnahmekapazität in Verbindung mit der Möglichkeit, die Satelliten zu schwenken und damit die Aufnahmerichtung in festgelegten Grenzen zu variieren, können große Gebiete der Erdoberfläche in wenigen Tagen komplett abgedeckt werden. Abbildung 3 zeigt als Beispiel die Komplettabdeckung mit Fernerkundungsdaten für ein großes Gebiet in Osteuropa durch RapidEye – Satelliten innerhalb weniger Tage.

Das Operationszentrum für das RapidEye Satellitensystem wird gegenwärtig in Brandenburg an der Havel aufgebaut. Hier entstehen die Anlagen für die operationelle Steuerung und Pro-

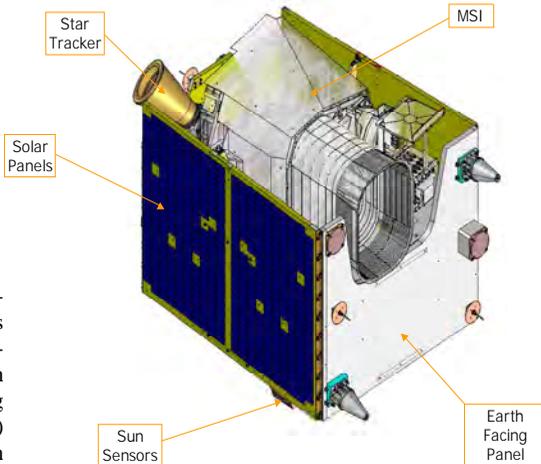


Abb. 2: Schematischer Aufbau des RapidEye Satelliten

grammierung der Satelliten einschließlich der dafür benötigten S-Band Antenne. Diese besteht aus einem Parabolspiegel mit 3 m Durchmesser, der auf dem Dach des RapidEye



Tag 1



Tag 2



Tag 3



Tag 4



Tag 5



Tag 6

Abb. 3: Abdeckung eines Gebietes durch RapidEye Satellitenaufnahmen

Gebäude in Brandenburg montiert sein wird. Weiterhin werden hier auch das Bodensegment zur Verarbeitung und Auswertung der Bilddaten installiert, sowie die Forschung und Produktentwicklung betrieben (Abbildung 4).

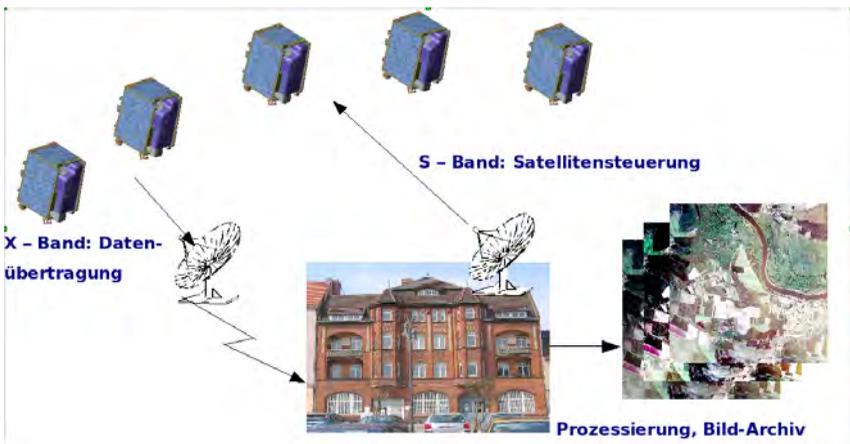


Abb 4: Satelliten- und Bodensegment des RapidEye - Fernerkundungssystems

Für den Empfang der Bilddaten (X-Band) sind Verträge mit mehreren Empfangsstationen in Deutschland, Europa und im außereuropäischen Raum in Vorbereitung. Die Übertragung der Bilddaten zum RapidEye Hauptquartier in Brandenburg erfolgt in kürzester Zeit über elektronische Datenübertragungswege, so dass die Bearbeitung der aufgenommenen Bilder in nahezu Echtzeit erfolgen kann.

3 Landbedeckungsklassifizierung

Zur Erzeugung thematischer Kartenprodukte wird gegenwärtig eine weitgehend automatisch arbeitende Prozessierungskette für die Erfassung der Landbedeckung auf der Basis von RapidEye Satellitendaten entwickelt und implementiert. Dabei geht es in erster Linie um die Bestimmung wesentlicher Grundklassen der Landbedeckung, die mit automatischen Verfahren hinreichend sicher getrennt werden können. Wesentlich für diese Methodenentwicklung sind folgende Voraussetzungen:

- Die radiometrische Inter-Kalibration der Satellitendaten in Verbindung mit einer routinemäßig durchgeführten Atmosphärenkorrektur sichert eine radiometrische Vergleichbarkeit der verwendeten Datensätze im Bereich von 5%.
- Für die Klassifizierung werden multi-temporale Datensätze von mindestens 3 Zeitpunkten aus einer Vegetationsperiode (Frühjahr – Sommer – Herbst) verwendet.
- Die Klassifizierungsmethodik basiert auf einem objektorientierten Ansatz unter Verwendung einer hierarchischen Klassifizierungsstrategie, bei der ausgehend von sehr stark generalisierten Grundklassen zu einer definierbaren Detailstufe fortgeschritten wird.
- Zur Trennung der Klassen werden sowohl spektrale Merkmale als auch Strukturmerkmale und Texturen benutzt.

Tabelle 2: Hierarchische Klassenstruktur

Hauptklassen	1. Detailstufe	2. Detailstufe
Wasserflächen	Binnengewässer	Binnengewässer
	Ozeane und Küstengewässer	Ozean
		Küstengewässer
Waldflächen	Waldflächen	Laubwald
		Nadelwald
		Mischwald
Offenland	Landwirtschaftsflächen	Ackerland
		Grünland
		Wein, Obstbäume, Olivenhaine
	Natürliche Vegetation	Heide, Savanne
		Trockenvegetation
	Vegetationsfrei	Verkehrsflächen, Gleisanlagen
		Felsen, Gestein
Sandflächen, Freier Boden, Wüste		
Eisflächen, Schnee		
Siedlungsflächen	Offene Bebauung	Gebäude, Versiegelte Flächen
		Parks und Grünflächen in offener Bebauung
	Dichte Bebauung	Gebäude, Versiegelte Flächen, Industrie

Tabelle 2 zeigt die Klassenstruktur der RapidEye Basisklassifizierung für die Landbedeckung. Diese Klassen können in den jeweils unterschiedlichen Detailstufen als Masken für weitergehende speziellere Untersuchungen und Klassifizierungsansätze genutzt werden, wie beispielhaft im folgenden Kapitel gezeigt wird.

4 RapidEye REX: Erkennung landwirtschaftlicher Fruchtarten

Für eine detailliertere Klassifizierung der Landwirtschaftsflächen wird bei RapidEye das REX-Programm (RapidEye Expert System) entwickelt. Das Ziel dieses Fruchtartenerkennungsprogramms ist es, weltweit die wichtigsten landwirtschaftlichen Kulturen weitestgehend automatisch zu erkennen. Daher muss der Klassifikationsansatz möglichst allgemeingültig und auf einfache Art und Weise auf verschiedene Gebiete übertragbar sein.

Die Satellitenkonstellation wird es ermöglichen, die Entwicklung der Vegetation über die ganze Wachstumsperiode regelmäßig zu verfolgen. Die Vorteile einer multi-temporalen Klassifizierung wurden schon von verschiedenen Autoren beschrieben: ODENWELLER & JOHNSON (1984) benutzten den GRABS Vegetationsindex (GReenness Above Bare Soil), um Aufgrund des unterschiedlichen Wachstumsverlaufs Mais and Sojabohnen zu unterscheiden. VOGELMANN & DEFELICE (2003) benutzten den Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), um Fruchtarten in South Dakota (USA) zu unterscheiden. ITZEROTT (2006) beschrieb einen Parallelepiped-Klassifikator, um mit Hilfe des NDVI landwirtschaftliche Kulturarten im Havelland zu erfassen.

4.1 Datensatz

Der hier beschriebene Klassifikationsansatz wurde auf der Basis von Daten entwickelt, die im Jahr 2000 mit dem Daedalus-Scanner des DLR Oberpfaffenhofen gewonnen wurden. Für diese Aufnahmen war ein von der Firma WIMEX betreutes Gebiet mit vorwiegend landwirtschaftlicher Nutzung in der Nähe von Dessau (Sachsen-Anhalt) ausgewählt worden. Die Fernerkundungsdaten wurden zu vier verschiedenen Zeitpunkten am 27. April, 11. Mai, 9. Juni und 1. August aufgenommen, zusätzlich wurden noch zwei Landsat Szenen vom 23. März und 14. August mit einbezogen. Alle Bilder wurden mit Hilfe von Pseudo-Invarianten Objekten auf Reflektanz kalibriert. Um den Effekt von Rand- und Mischpixeln zu minimieren, wurde die Feldgröße um einen 45 m weiten Pufferbereich reduziert. Dadurch wurden auch einige kleine Felder vollständig eliminiert, es verblieben für die Untersuchungen 141 Felder. Auf diesen Flächen wurden alle Feldkulturen angebaut, welche typischerweise in Mitteleuropa vorkommen. Der Datensatz war von HÖBER (2001) in Trainings- und Verifikationsflächen unterteilt worden. Diese Unterteilung wurde beibehalten, wobei entsprechend die Trainingsfelder zur Anpassung der Kurven benutzt wurden, während die Verifikationsflächen zur statistischen Analyse der Genauigkeit der Klassifizierungsmethode dienen.

Von den Feldern waren auch die Aussaattermine bekannt. Basierend auf dem kulturspezifischen Wärmebedürfnis während der Keimdauer (WILKENS & SINGH, 2001) wurde das Datum des Feldaufgangs berechnet. Die Informationen über die typischen Auflauftermine der wichtigsten landwirtschaftlichen Feldfrüchte, welche in Deutschland angebaut werden, stammten von NÖHLES (2000).

4.2 Klassifikationsansatz

Der Wachstumsverlauf der Blattfläche kann mit einer exponentiellen Kurve beschrieben werden: CLEVERS et al. (2002) modellierten den Verlauf der LAI-Kurve (Leaf Area Index) von Weizen in Relation zur Zeit (ausgedrückt in Kalendertagen), um den Effekt von verschiedenen Stickstoffdüngungsstufen auf den Verlauf des Blattwachstums zu modellieren. Die Temperatur hat jedoch einen großen Einfluss auf das Pflanzenwachstum - warmes Wetter beschleunigt es und kühles Wetter verlangsamt es. Damit die Kurven auch unter verschiedenen Umgebungsbedingungen (Regionen, Jahren, und Saatdaten) Gültigkeit haben und übertragbar sind, wird in unserem Ansatz das Wachstum in Bezug auf kumulierte Temperatursummen oberhalb einer kulturspezifischen Basistemperatur ausgedrückt. Abbildung 5 zeigt die angepasste Kurve zum Verlauf der Entwicklung des NDVI für Winterweizen für die Zeit nach dem Beginn des Wachstums im Spätwinter bis zur Reife im Sommer. Die Kurven wurden für zwei verschiedene Vegetationsindizes angepasst: NDVI und WDI (Weighted Difference Vegetation Index, CLEVERS, 1989).

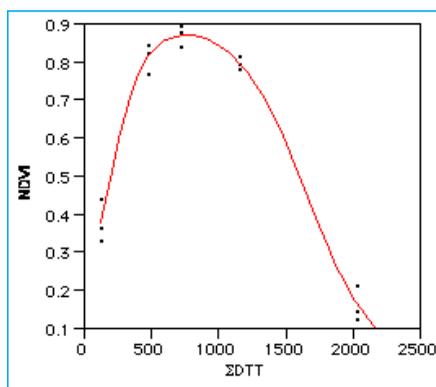


Abb. 5: Beispiel einer Verlaufskurve des NDVI von Winterweizen. Auf der x-Achse sind die akkumulierten Tagestemperaturen (in Grad) nach dem Wachstumsbeginn im Spätwinter dargestellt.

Parallel zu REX wird bei RapidEye außerdem auch ein Programm zur Erkennung von Feldgrenzen entwickelt. Damit wird es möglich, einen objekt-orientierten Klassifizierungsansatz zu benutzen und kontextbasierte Information einfacher zu integrieren.

Der vorgestellte Klassifikationsansatz wurde teilweise im Programm eCognition der Firma DEFINIENS (BENZ, 2004) implementiert. Das Programm erlaubt es, Wissen auf eine relativ einfache Art in ein objekt-basiertes Klassifikationssystem einzubauen. Zuerst wurden die Grob-Klassen SummerCrop (Sommerkultur) und WinterCrop (Winterkultur) erstellt. Diese Separierung basiert auf dem Datum des Feldaufgangs im Herbst bzw. im Frühjahr. Das Datum des Feldaufgangs wird aber auch als zusätzliches Entscheidungskriterium benutzt, um die Kulturen innerhalb der beiden Klassen zu unterscheiden. Generell wird im Herbst zuerst Raps gepflanzt, gefolgt von Gerste, Roggen, Triticale und Weizen. Im Frühjahr werden zuerst Erbsen und Zuckerrüben gepflanzt, während Mais, welcher keinen Frost erträgt, zuletzt gepflanzt wird. Kartoffeln werden über die ganze Pflanzperiode im Frühjahr angebaut.

Kulturspezifische Wachstumskurven stellen das Kernstück der Klassifikation dar. Dazu werden, beginnend mit dem Datum des Feldaufgangs, die Temperatursummen bis zu den Tagen der Satellitenbilddaufnahme berechnet. Im nächsten Schritt werden dann die entsprechenden numerischen Referenzwerte für den NDVI und den WDWI separat für alle Kulturen und Aufnahmeetermine bestimmt. Die mit einer definierbaren Funktion (siehe Abbildung 6) gewichteten Unterschiede zwischen dem NDVI für die Ackerfläche und dem entsprechenden Referenzwert bestimmen dann eine potentielle Klassenzugehörigkeit. Für den WDWI wird ebenfalls eine potentielle Klassenzugehörigkeit nach dem gleichen Verfahren ermittelt. Die endgültige Klassenzuordnung erfolgt dann regelbasiert auf der Grundlage beider Ergebnisse und des Datums vom Feldaufgang.

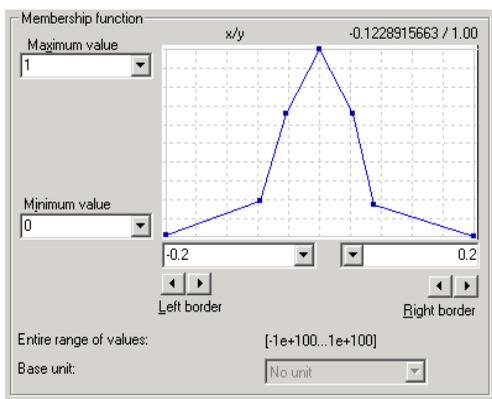


Abb. 6: Definition des Klassenzugehörigkeitswerts aufgrund der Differenz des NDVI zwischen dem Mittelwert eines Feldes und dem Kurvenwert. Die Klassenzugehörigkeit hat ein Maximum von 1 und nimmt ab bis 0, wenn die Differenz mehr als 0.2 NDVI Einheiten beträgt.

4.3 Resultate und Diskussion

Die statistische Aussagefähigkeit der Resultate ist beschränkt, da für einige Kulturen nur sehr wenige Felder zur Verfügung standen (Tabelle 3). Insgesamt konnte das Klassifikations-system die im Herbst ausgesäten Kulturen relativ gut unterscheiden, wobei zu bemerken ist, dass die drei Getreidearten Roggen, Weizen und Triticale (Kreuzung der beiden erstgenannten Kulturen Roggen und Weizen) in eine Gruppe zusammengelegt wurden. Bei den im Frühjahr ausgesäten Kulturen konnte das Klassifizierungsergebnis durch die Einbeziehung von Texturparametern verbessert werden. Dennoch wurden immer noch einige Kartoffelfelder als Mais und umgekehrt Maisfelder als Kartoffelfelder fehlerhaft klassifiziert.

Tabelle 3: Übersicht der Klassifizierungsergebnisse. Die Gruppe Wintergetreide besteht aus Roggen, Triticale, und Weizen.

		Klassifiziert als							
		Gerste	Raps	Mais	Brache	Erbsen	Kartoffeln	Zuckerrueben	Wintergetreide
Beobachtet	Gerste	4							
	Raps		8						
	Mais			33				2	1
	Brache				16				
	Erbsen					3			
	Kartoffeln			5			6		2
	Zuckerrueben							8	
	Wintergetreide	4							50

Im Durchschnitt konnte eine Klassifikationsgenauigkeit von über 80% erreicht werden (Tabelle 4). Bei den Kartoffeln wurden die schlechtesten Resultate erzielt. Bei der Analyse stellte es sich dann anschließend heraus, dass einige Felder frühzeitig geerntet worden waren. Daraus wurde die Schlussfolgerung abgeleitet, dass der Klassifikationsansatz mit einer Regel bezüglich eines frühzeitigen Erntetermins ergänzt werden sollte, um auch hier bessere Resultate zu erzielen. Wenn auch die statistische Aussagekraft aufgrund der relativ geringen Anzahl der zur Verfügung stehenden Felder beschränkt war, sind diese ersten Resultate dennoch sehr vielversprechend. Weitere Arbeiten zur Überprüfung und Optimierung des Ansatzes mit einem erheblich umfangreicheren Datensatz werden gegenwärtig durchgeführt.

Tabelle 4. Statistische Analyse der Genauigkeit der Klassifikation.

	Producer's Accuracy	User's Accuracy
Gerste	66.67	50
Raps	100	100
Mais	91.67	86.84
Brache	100	100
Erbsen	100	100
Kartoffeln	41.67	71.43
Zuckerrueben	100	72.73
Wintergetreide	92.59	96.15
Durchschnitt	86.57	84.64

5 Literaturverzeichnis

- BENZ, U. C., HOFMANN, P., WILLHAUCK, G., LINGENFELDER, I. & HEYNE, M., 2004: Multiresolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. - ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 58, S. 239-258.
- CLEVERS, J. G. P. W., 1988: The derivation of a simplified reflectance model for the estimation of leaf area index. - Remote Sensing of Environment 25, S. 53-69.
- CLEVERS, J.G.P.W., VONDER, O.W., JONGSCHAAP, R.E.E., DESPRATS, J.-F., KING, C., PRÉVOT, L. & BRUGUIER, N., 2002: Using SPOT data for calibrating a wheat growth model under mediterranean conditions. - Agronomie 22, S. 687-694.
- HÖBER, E., 2001. Regelbasiert hierarchische Klassifikation von Feldfrüchten unter Verwendung multitemporaler Fernerkundungsdaten. Diplomarbeit. Ludwig-Maximilians-Universität, München.
- ITZEROTT, S., 2006. Zur Güte der automatisierten Erkennung von Ackerkulturen in Abhängigkeit vom Bodenmuster.
Online: <www.uni-potsdam.de/imaf/documents/IMAF_060210_Itzerott.pdf>
- NOEHLES, I., 2000. Eintrittstermine von Auflaufen und Ernte verschiedener Feldfrüchte. Interne Mitteilungen Vereinigte Hagelversicherung VVaG, Giessen.
- ODENWELLER, J. B. & JOHNSON K. I., 1984. Crop identification using Landsat temporal-spectral profiles. - Remote Sensing of Environment 14, S. 39-54.

- VOGELMANN, J. E. & DEFELICE T. P., 2003. Characterization of intra-annual reflectance properties of land cover classes in southeastern South Dakota using Landsat TM and ETM+ data. - Canadian Journal of Remote Sensing 29, S. 219-229.
- WILKENS P. & SINGH, U. 2001. A Code-Level Analysis for Temperature Effects in the CERES Models In Modeling Temperature Response in Wheat and Maize. Jeffrey W. White, Editor. S. 1-7.
- Online: <http://www.cimmyt.org/english/docs/proceedings/nrgGIS_0301.pdf>

Pansharpening – Ein Beitrag zur quantitativen Bewertung

UWE WEIDNER¹ & MARC MÜLLER¹

Zusammenfassung: Seit der Verfügbarkeit hochauflösender Satellitenbilddaten sind zahlreiche Verfahren für die Panschärfung (Pansharpening) entwickelt worden. Eine Bewertung der Ergebnisse des Pansharpening erfolgt im Allgemeinen durch visuellen Vergleich und ist somit subjektiv. Dies ist im Falle einer anschließenden Nutzung der pangeschärften Daten durch visuelle Interpretation gerechtfertigt. Trotzdem stellt sich die Frage nach Möglichkeiten der quantitativen Bewertung. Mit dieser Thematik beschäftigen sich im Vergleich zur Anzahl der publizierten Pansharpening-Verfahren nur wenige Beiträge, die zum Teil sehr unterschiedliche Kenngrößen vorschlagen. Aus diesem Grund werden innerhalb dieses Beitrags Möglichkeiten einer quantitativen Bewertung untersucht und diskutiert.

1 Einleitung

Viele Erdbeobachtungssensoren und flugzeuggetragene digitale Kameras liefern panchromatische Bilder mit einer hohen räumlichen Auflösung und multispektrale Bilder mit einer geringeren räumlichen Auflösung. Dies ist u. a. durch die am Sensor ankommende Strahlungsenergie in den Spektralbereichen der jeweiligen Kanäle bedingt: Der panchromatische Kanal erfasst gegenüber den einzelnen multispektralen Kanälen einen breiteren Wellenlängenbereich. Zieht man diese Limitation in Betracht, so wird deutlich, dass die Entwicklung von effektiven Pansharpening-Verfahren eine Möglichkeit bietet, multispektrale Daten mit einer ebenso hohen räumlichen Auflösung wie die der panchromatischen Daten bereitzustellen. Pansharpening-Verfahren können folglich das Anwendungspotenzial der multispektralen Bilder erhöhen. Seit der Verfügbarkeit hochauflösender Satellitenbilddaten sind zahlreiche Verfahren für die Panschärfung entwickelt worden. Diese Methoden fusionieren die geometrische Detailinformation des hochauflösenden panchromatischen Kanals und die Information der geringer auflösenden multispektralen Kanäle zu einem hochauflösenden multispektralen Bild. Zahlreiche Beiträge mit dem Schwerpunkt auf der Entwicklung von Pansharpening-Verfahren gerade für hochauflösende Satellitendaten sind in der jüngeren Vergangenheit veröffentlicht worden. Beispiele hierfür sind CHENG et al. (2003), EHLERS et al. (2004) und EHLERS (2005). Zu den dabei am häufigsten angewandten Methoden zählen IHS-Transformationen, Hauptkomponentenanalyse, arithmetische Kombinationen und Wavelet-basierte Transformationen (vgl. ZHANG, 2004). Im Vergleich zur Anzahl von Veröffentlichungen zur Verfahrensentwicklung ist die Anzahl von Beiträgen zur Bewertung – insbesondere auch der quantitativen Bewertung – eher gering. Zu diesen Beiträgen gehören u. a. LAPORTERIE-DEJEAN et al. (2003), LI et al. (2004), GARZELLI et al. (2004, 2005), NIKOLAKOPOULOS (2004, 2005), TSAI (2004) und SEETHA et al. (2005), die sich mit der Qualität der spektralen Information der pangeschärften Daten beschäftigen. Demgegenüber liegt der Schwerpunkt von XYDEAS & PETROVIC (2000) und BUNTILOV & BRETSCHNEIDER (2005) auf der Bewertung der durch die Schärfung erzielten räumlichen Verbesserung der multispektralen im Vergleich zu den höher aufgelösten panchromatischen Daten.

¹ Dr.-Ing. Uwe Weidner / Dr. Marc Müller, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Universität Karlsruhe (TH), Englerstr. 7, 76128 Karlsruhe, E-Mail: (uwe.weidner, marc.mueller)@ipf.uni-karlsruhe.de

In diesem Beitrag werden die in der Literatur vorgeschlagenen Kenngrößen hinsichtlich ihrer Eignung für die Bewertung der spektralen Eigenschaften genauer betrachtet und untersucht. In der oben angegebenen Literatur werden Kenngrößen jeweils aufgrund des Gesamtbildes als Stichprobe bestimmt. In Anlehnung an PERKO (2004) wird hier auch zwischen homogenen und nicht-homogenen Bereichen unterschieden, da gerade in nicht-homogenen Bereichen, z. B. Kantenbereichen, häufig größere Abweichungen auftreten und diese nicht nur bei einer visuellen Interpretation störend sein können. Im Rahmen der Untersuchungen werden exemplarisch eine Reihe von Verfahren – IHS, Brovey, Hauptkomponentenanalyse und ZHANG (2004) – für das Pansharpening von QuickBird-Daten urbaner Gebiete angewandt und die Ergebnisse evaluiert.

2 Pansharpening-Verfahren und Kenngrößen

2.1 Pansharpening-Verfahren

IHS-Transformation: Bei der IHS-Transformation wird ein dreikanaliges Bild aus dem RGB-Farbraum in den IHS-Farbraum konvertiert, der erhaltene Intensitätskanal I_{RGB} durch den höher auflösenden PAN-Kanal I_{PAN} substituiert. Anschließend werden diese Daten in den RGB-Farbraum rücktransformiert. Eine Voraussetzung zur Vermeidung von Farbverschiebungen bei dieser Vorgehensweise ist, dass die Kanäle I_{RGB} und I_{PAN} ähnlich sind. Aufgrund der von den einzelnen Sensoren erfassten Spektralbereiche ist dies jedoch nicht gegeben. Daher ist der PAN-Kanal um seinen IR-Anteil zu reduzieren und eine Anpassung zwischen diesen reduzierten Intensitäten I_{PAN-IR} und den Intensitäten I_{RGB} , z. B. durch Histogrammanpassung, durchzuführen. Bei IHS-Verfahren werden jeweils nur drei Kanäle berücksichtigt. Daher wurden für vier durch Permutation erhaltene Kanalkombinationen die Transformationen einzeln durchgeführt und die Ergebnisse gemittelt.

Brovey-Transformation: Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass alle multispektralen Kanäle gleichzeitig berücksichtigt werden können. Dieses Verfahren (BROV1) kann zum einen dadurch verfeinert werden, dass die Intensitäten I_{MS} aus der Summe der multispektralen Signale und I_{PAN} über ihren mittleren Quotienten angepasst werden (BROV1A), zum anderen kann zusätzlich eine Gewichtung der einzelnen Kanäle erfolgen (BROV2). Im Hinblick auf die erfassten Spektralbereiche der Kanäle kann z. B. der IR-Kanal doppelt gewichtet werden.

Hauptkomponentenanalyse: Auch bei Verfahren, basierend auf der Hauptachsen-Transformation (PCSH) können alle multispektralen Kanäle gleichzeitig einfließen. Hierbei werden die multispektralen Kanäle transformiert, die 1. Hauptkomponente durch die höher auflösenden Daten substituiert und anschließend eine Rücktransformation durchgeführt. Wie bei der IHS-Transformation stellt sich auch hier die Frage nach der Ähnlichkeit der auszutauschenden Kanäle, so dass ebenfalls eine Anpassung erfolgen muss. Damit dieses Verfahren tatsächlich eine Schärfung bewirkt, muss die 1. Hauptkomponente gegenüber den anderen die wesentliche Information tragen.

Verfahren nach ZHANG (2002): Das Verfahren (PANSH) nutzt die Methode der kleinsten Quadrate, um einerseits die Gewichtung der einzelnen multispektralen Kanäle zu bestimmen und andererseits eine Anpassung zwischen den Intensitätswerten der geschärfen Kanäle durchzuführen. Daher werden die notwendigen Parameter auf Grundlage der jeweils eingehenden Daten bestimmt. Details dieses Verfahrens sind unseres Wissens bisher nicht publiziert. Das Verfahren ist als Modul in Geomatica (V10.0) realisiert.

2.2 Kenngrößen

Aus der Literatur sind eine Reihe von Kenngrößen zur Bewertung der Ergebnisse von Pan-sharpening-Verfahren bekannt. Im Folgenden werden einige davon diskutiert. In den Formeln bezeichnen $a(r,c)$ die originären und $b(r,c)$ die pangeschärften multispektralen Daten. Die nach unserem Literaturstudium am häufigsten genutzte Kenngröße ist die Korrelation. Sie bewertet die Ähnlichkeit der beiden eingehenden Signale. Aufgrund des einfließenden Mittelwertes werden Offsets zwischen den Signalen nicht mitbewertet. Diese führen jedoch zu Farbverschiebungen, so dass diese Kenngröße allein nicht hinreichend erscheint. Solche Offsets werden durch RMSE und die mittlere absolute Differenz berücksichtigt. Das Optimum für beide Werte ist Null. Die Nutzung der mittleren absoluten Differenz bestraft im Vergleich zu RMSE größere Abweichungen an einzelnen Bildelementen nicht so stark. Beide Kenngrößen geben jedoch keinen Hinweis auf die Größenordnung der Abweichungen in Relation zur Größenordnung des jeweiligen Signalwertes. Dies wird z. B. durch die mittlere relative Differenz

$$MRD = \frac{1}{N} \sum_1 \frac{a(r,c) - b(r,c)}{a(r,c)} \quad (\text{Gl. 1})$$

und die mittlere absolute relative Differenz

$$MARD = \frac{1}{N} \sum_1 \left| \frac{a(r,c) - b(r,c)}{a(r,c)} \right| \quad (\text{Gl. 2})$$

berücksichtigt. Statt des Mittelwertes kann der Median als robustere Kenngröße genutzt werden. Das Optimum für beide Werte ist Null. Im Vergleich zu dieser Kenngröße erscheinen Mittelwert und Median der normierten Differenz

$$ND = \frac{a(r,c) - b(r,c)}{a(r,c) + b(r,c)} \quad (\text{Gl. 3})$$

bzw. ihr Absolutwert nur bedingt geeignet. Außerdem sind die Werte in Abhängigkeit der Größenordnungen des pangeschärften und des originären Signals z. T. nur schwer zu interpretieren.

Neben diesen Größen können Differenzbilder der Signale und ihre Histogramme zur Bewertung genutzt werden. Auf der Grundlage dieser Histogramme können Minimum, Maximum, Median, Mittelwert, Varianz/Streuung, Schiefe, Entropie und Anisotropie der Differenzen berechnet werden. Minimum und Maximum dienen zur Feststellung der größten Abweichungen, sind aber auch abhängig vom Offset zwischen den zu vergleichenden Signalen. Das Optimum für Mittelwert und Median ist Null. Varianz und Streuung sollten gering sein, die Schiefe – unter der Annahme, dass positive und negative Differenzen in ähnlicher Größenordnung gleichhäufig auftreten – ebenfalls Null. Die Auswertung der Histogramme kann auch unter Ausschluss von maximalen und minimalen Werten erfolgen. Hierdurch werden Ausreißer für die Bewertung eliminiert. Alle angegebenen Kenngrößen bzw. das Histogramm des Differenzbildes und die daraus abgeleitete Kenngrößen werden für den Gesamtdatensatz sowie für homogene und nicht-homogene Bereiche berechnet (vgl. PERKO, 2004).

3 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die bisherigen Ergebnisse der Untersuchungen zur Bewertung von Pansharpening-Verfahren vorgestellt. Auch wenn die quantitative Bewertung im Vordergrund steht, soll zu Beginn ein visueller Vergleich der Ergebnisse erfolgen. Die Datenbasis für die Untersuchungen sind QuickBird-Aufnahmen von zwei urbanen Gebieten – drei Szenen unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte von Mai bis September. Die Abbildungen 1 und 2 zeigen die Originaldaten (PAN und RGB), Abbildung 3 die später bei der quantitativen Bewertung genutzten Kantenbereiche. In den Abbildungen 4 bis 9 sind die Ergebnisse der Verfahren für einen Detailausschnitt visualisiert. Größere Ausschnitte geben sicherlich einen besseren Eindruck hinsichtlich der Erhaltung der spektralen Daten, erlauben jedoch nicht, die Qualität der Schärfung zu veranschaulichen. Vergleicht man die erzielten Ergebnisse, so ist festzustellen, dass alle bis auf das Verfahren, das auf der Substitution der ersten Hauptkomponente basiert, eindeutig zu einer Schärfung der Daten führen. Das Ergebnis dieses Verfahrens ist – wie bereits oben erwähnt – abhängig von der Dominanz dieser Hauptkomponente sowie ihrer Ähnlichkeit mit den sie ersetzenden Intensitätswerten des PAN-Kanals und somit sehr datenabhängig. Zusätzlich treten Artefakte an Kanten von homogenen Bereichen und Farbverschiebungen auf. Hinsichtlich der spektralen Eigenschaften zeigt der visuelle Vergleich bei den anderen Verfahren – mit Ausnahme von BROV1 und BROV1A – nur geringe Unterschiede in den homogenen Bereichen. In den Kantenbereichen sind die einfachen Verfahren wie die hier angewandten modifizierten Brovey- und IHS-Transformationen jedoch dem Verfahren nach ZHANG (2004) unterlegen. Beispiele hierfür sind die Kantenbereiche des Hochhausschattens sowie die Schatten in den Baumbereichen. In den aus allen multispektralen Kanälen gemittelten Differenzbildern (Abbildungen 10 bis 12) sind diese Effekte und ihre Größenordnungen – auch in Abhängigkeit der Visualisierung – nicht ersichtlich, jedoch in den Histogrammen dieser Differenzbilder (Abbildungen 13 und 14). Dies führt zu der Frage, ob sich diese qualitativen Beobachtungen auch durch Kenngrößen feststellen lassen.

Für die quantitative Bewertung wurden alle oben aufgeführten Kenngrößen berechnet. Als Referenzdaten wurden die mittels bilinearer Interpolation auf die höhere Auflösung umgerechneten originären multispektralen Daten verwendet. Die Berechnung der Kenngrößen erfolgte wie zuvor bereits begründet für die gesamte Szene, die homogenen und die nicht-homogenen Bereiche. Auf Grundlage des PAN-Bildes wurden Kanten mittels Sobel-Operator detektiert und eine Maske erstellt (Abbildung 3). Des Weiteren wurden auf der einen Seite alle Daten, auf der anderen Seite um einen wählbaren Prozentsatz (hier 5%) von minimalen und maximalen Werten reduzierte Daten verwendet. Die Ergebnisse für ausgewählte Kenngrößen sind in der Tabelle 1 zusammengefasst. Um einen schnellen Überblick zu ermöglichen, wurden die Werte farblich gekennzeichnet: der beste Wert dunkelgrün, der zweitbeste Wert hellgrün, der schlechteste Wert rot und der zweit schlechteste Wert orange. Zum Teil sind die Unterschiede nicht besonders groß, so dass sich die Frage nach ihrer Signifikanz stellt.

Für das Verfahren BROV1 ergeben sich durchgehend schlechte Werte für die Kenngrößen. Dies ist bedingt durch Offsets der Intensitätswerte der einzelnen Kanäle, die in Abbildung 4 durch die Automatismen bei der Visualisierung in Geomatica abgefangen werden. BROV1A beinhaltet gegenüber BROV1 eine Verbesserung durch Berücksichtigung des Faktors aus den PAN-Intensitäten I_{PAN} der Pixel und der Intensität I_{MS} , die aus der Summe der Intensitäten der



Abb. 1: Originaldaten PAN



Abb. 2: Originaldaten RGB

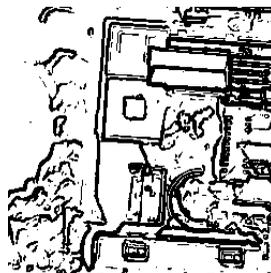


Abb. 3: Kantenbereiche



Abb. 4: BROV1



Abb. 5: BROV1A



Abb. 6: BROV2



Abb. 7: IHS



Abb. 8: PCSH



Abb. 9: PANS



Abb. 10: Differenz BROV2



Abb. 11: Differenz IHS



Abb. 12: Differenz PANS

Tab. 1: Ausgewählte Kenngrößen

Datensatz		Gesamt			Kantenbereiche			homogene Bereiche		
		Korrelation	Mittel ARD	Median ARD	Korrelation	Mittel ARD	Median ARD	Korrelation	Mittel ARD	Median ARD
B	BROV1	0,760	0,397	0,394	0,763	0,407	0,382	0,752	0,394	0,398
	BROV1A	0,760	0,142	0,122	0,763	0,170	0,142	0,752	0,134	0,117
	BROV2	0,853	0,113	0,080	0,815	0,165	0,129	0,880	0,097	0,069
	IHS	0,883	0,133	0,103	0,839	0,182	0,137	0,911	0,118	0,095
	PCSH	0,977	0,051	0,044	0,973	0,059	0,049	0,979	0,049	0,043
	PANSH	0,862	0,089	0,063	0,816	0,139	0,113	0,896	0,074	0,053
G	BROV1	0,846	0,397	0,394	0,832	0,407	0,382	0,853	0,394	0,398
	BROV1A	0,846	0,142	0,122	0,832	0,170	0,142	0,853	0,134	0,117
	BROV2	0,899	0,113	0,080	0,863	0,165	0,129	0,925	0,097	0,069
	IHS	0,909	0,123	0,095	0,875	0,170	0,129	0,932	0,109	0,088
	PCSH	0,989	0,049	0,042	0,988	0,055	0,047	0,990	0,047	0,041
	PANSH	0,876	0,110	0,078	0,834	0,170	0,139	0,908	0,092	0,065
R	BROV1	0,922	0,396	0,394	0,897	0,406	0,381	0,938	0,393	0,397
	BROV1A	0,922	0,142	0,121	0,897	0,170	0,142	0,938	0,133	0,117
	BROV2	0,942	0,113	0,079	0,910	0,165	0,129	0,963	0,097	0,069
	IHS	0,952	0,135	0,106	0,921	0,183	0,137	0,971	0,121	0,098
	PCSH	0,980	0,112	0,090	0,975	0,123	0,100	0,984	0,108	0,087
	PANSH	0,888	0,176	0,123	0,841	0,261	0,212	0,921	0,150	0,103
IR	BROV1	0,957	0,397	0,395	0,882	0,408	0,382	0,973	0,394	0,398
	BROV1A	0,957	0,142	0,122	0,882	0,170	0,142	0,973	0,134	0,117
	BROV2	0,939	0,113	0,080	0,838	0,165	0,129	0,962	0,097	0,069
	IHS	0,834	0,172	0,141	0,683	0,222	0,170	0,884	0,157	0,134
	PCSH	0,619	0,285	0,226	0,481	0,353	0,261	0,691	0,265	0,218
	PANSH	0,918	0,124	0,081	0,771	0,201	0,147	0,955	0,101	0,068
Differenz	Median	Mittel	σ	Median	Mittel	σ	Median	Mittel	σ	
	BROV1	-114,22	-110,54	78,63	-110,50	-118,70	111,38	-115,09	-108,07	65,34
	BROV1A	-3,31	0,74	55,74	-0,43	-0,05	77,32	-4,10	0,98	47,29
	BROV2	-1,24	-0,99	53,51	1,37	-6,50	82,47	-1,62	0,68	40,71
	IHS	1,26	-11,08	63,20	-1,76	-21,97	94,29	1,88	-7,78	49,62
	PCSH	-3,28	-0,01	20,82	-0,83	4,38	27,41	-3,96	-1,34	18,15
PANSH	-1,00	-0,57	41,21	2,00	-0,59	66,14	-1,00	-0,57	29,78	
G	BROV1	-152,23	-150,72	114,42	-146,57	-163,64	165,39	-153,54	-146,80	93,28
	BROV1A	-4,44	0,35	77,08	-0,57	-0,30	110,92	-5,52	0,55	63,33
	BROV2	-1,66	-2,81	75,74	1,82	-10,68	119,56	-2,18	-0,42	55,84
	IHS	2,01	-13,94	82,36	-2,24	-27,34	125,24	2,87	-9,87	63,34
	PCSH	-4,19	-0,01	26,65	-1,07	5,60	35,09	-5,07	-1,71	23,23
	PANSH	-1,00	-1,12	68,37	2,00	-1,11	110,04	-1,00	-1,12	49,19
R	BROV1	-84,21	-90,22	81,80	-80,93	-102,05	122,27	-84,90	-86,62	64,27
	BROV1A	-2,55	1,47	50,36	-0,32	0,57	77,15	-3,18	1,74	38,72
	BROV2	-0,92	-3,29	52,00	0,99	-8,98	84,53	-1,20	-1,56	36,67
	IHS	1,39	-15,92	65,32	-1,05	-27,47	99,97	1,89	-12,42	49,78
	PCSH	-5,35	-0,01	34,00	-1,36	7,15	44,78	-6,47	-2,18	29,64
	PANSH	-1,00	-0,80	61,82	2,00	-0,82	99,48	-1,00	-0,79	44,48
IR	BROV1	-225,56	-264,24	212,63	-212,49	-244,20	212,85	-231,31	-270,32	212,18
	BROV1A	-6,15	-25,21	108,07	-0,81	-13,65	130,11	-7,68	-28,71	100,17
	BROV2	-2,47	-2,39	90,27	2,68	-4,68	129,84	-3,24	-1,70	74,20
	IHS	9,93	1,86	133,17	-3,62	-22,49	178,73	13,58	9,25	114,84
	PCSH	34,27	0,07	217,85	8,72	-45,79	286,87	41,46	13,97	189,89
	PANSH	-2,00	-0,90	99,44	4,00	-3,03	154,87	-3,00	-0,26	74,90

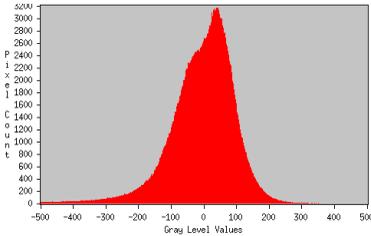


Abb. 13: Histogramm der Differenzen IHS

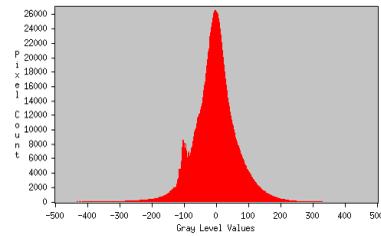


Abb. 14: Histogramm der Differenzen PANSH

multispektralen Kanäle berechnet wird. Auf den Korrelationswert hat dies keinen Einfluss. PCSH liefert gemäß den Kenngrößen gute Ergebnisse, jedoch zeigt der visuelle Vergleich Artefakte und ein schlechtes Ergebnis hinsichtlich der Schärfung. Hierdurch ergeben sich nur geringe Änderungen gegenüber den originären multispektralen Daten und damit gute Kennwerte. Dies zeigt, dass neben einer quantitativen eine visuelle Bewertung unerlässlich ist. Für die anderen Verfahren ergibt sich ein gemischtes Bild für die einzelnen Kenngrößen. Nimmt man RMSE und die mittlere absolute Differenz als Bewertungskriterien, so erhalten nur BROV2 und PANSH keine rote oder orange Markierung. Für alle Kenngrößen zeigen sich z. T. deutliche Unterschiede bezüglich der einzelnen Spektralkanäle. Festzuhalten bleibt, dass die Werte der Kenngrößen für die homogenen Bereiche in Allgemeinen besser ausfallen als für die Kantenbereiche. Für die Auswertung der wie zuvor beschrieben reduzierten Daten ergibt sich ein ähnliches Bild, nur im Detail sind kleinere Änderungen festzustellen. Hieraus ist zu schließen, dass keine Ausreißer das auf dem Gesamtdatensatz basierende Bewertungsergebnis grob verfälschen. Auch die Auswertung der Daten für zwei weitere Szenen zeigt keine groben Änderungen der Bewertungsergebnisse.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden Möglichkeiten einer quantitativen Bewertung der Ergebnisse von Pansharpenting-Verfahren diskutiert und untersucht. Die bisher erzielten Ergebnisse zeigen, dass neben einer quantitativen Bewertung der spektralen Eigenschaften eine visuelle Bewertung unerlässlich ist. Zum einen haben einige Effekte wie Artefakte keinen wesentlichen Einfluss auf die Werte der vorgestellten Kenngrößen, zum anderen ist die Bewertung der Schärfung durch Kenngrößen von Bedeutung. In einer Erweiterung des bisherigen Ansatzes zur quantitativen Bewertung ist dies zu berücksichtigen. Aus der Gesamtgruppe der untersuchten Verfahren kristallisierten sich einige Verfahren heraus, bei denen die Kenngrößen uneinheitlich sind und ihre Unterschiede sich nur im Detail zeigen. Die Frage nach der Einsetzbarkeit des jeweiligen Verfahrens ist sicherlich abhängig von der Anwendung. Einfache Verfahren liefern durchaus brauchbare Ergebnisse, wenn sie die Eigenschaften der Daten berücksichtigen, z. B. durch Abgleich der Intensitätsinformation zwischen PAN-Kanal auf der einen und den multispektralen Kanälen auf der anderen Seite (vgl. PERKO, 2004). Bessere Ergebnisse zeigen sich bei dem Verfahren nach ZHANG (2002) durch Modellierung der spektralen Kanäle und ihrer Abhängigkeiten bei der visuellen Bewertung. Die Verifizierung der hier vorgestellten Ergebnisse erfordert weitere Untersuchungen auf der Basis anderer Datensätze als den hier genutzten Satellitenszenen urbaner Gebiete. Eine Einbeziehung weiterer Pansharpenting-Verfahren in die Untersuchungen ermöglicht darüber hinaus einen Vergleich der in der Literatur durchgeführten Bewertungen.

5 Literaturverzeichnis

- BUNTILOV, V. & BRETSCHNEIDER, T. (2005): A Fusion Evaluation Approach with Region Relating Objective Function for Multispectral Image Sharpening. In: *IGARSS 2005, Seoul*. CD-ROM.
- CHENG, P. & TOUTIN, T. ; ZHANG, Y. ; WOOD, M. (2003) : QuickBird – Geometric Correction, Path and Block Processing and Data Fusion. *Earth Observation Magazine*, May 2003.
- EHLERS, M.; WELCH, R. & LING, Y. (2004): GIS and Context Based Image Enhancement. In: *IAPRSIS, Vol. XXXV, Part B (Comm. IV)*, CD-ROM.
- EHLERS, M. (2005): Beyond Pansharpening: Advances in Data Fusion for Very High Resolution Remote Sensing Data. In: *ISPRS Workshop High Resolution Earth Imaging for Geospatial Information, Vol. XXXVI Part I/W3*, CD-ROM.
- GARZELLI, A.; NENCINI, F.; ALPARONE, L.; AIAZZI, B. & BARONTI, S. (2004): Pan-Sharpening of Multispectral Images: A Critical Review and Comparison. In: *IGARSS 2004, Anchorage*, CD-ROM.
- GARZELLI, A.; NENCINI, F.; ALPARONE, L. & BARONTI, S. (2005): Multiresolution Fusion of Multispectral and Panchromatic Images through the Curvelet Transformation. In: *IGARSS 2005, Seoul*. CD-ROM.
- 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. In: *2nd GRSS / ISPRS Joint Workshop on Data Fusion and Remote Sensing over Urban Areas*, pp. 95–98.
- LI, C.; LIU, L.; WANG, J.; ZHAO, C. & WANG, R. (2004): Comparison of Two Methods of the Fusion of Remote Sensing Images with Fidelity of Spectral Information. In: *IGARRS 2004, Anchorage*, CD-ROM.
- NIKOLAKOPOULOS, K. G. (2004): Comparison of Four Different Fusion Techniques for IKONOS Data. In: *IGARSS 2004, Anchorage*, CD-ROM.
- NIKOLAKOPOULOS, K. G. (2005): Comparison of Six Fusion Techniques for SPOT5 Data. In: *IGARSS 2005, Seoul*. CD-ROM.
- PERKO, R. (2004): *Computer Vision for Large Format Digital Aerial Cameras*. PhD thesis, Institute for Computer Graphics and Vision, Graz University of Technology
- SEETHA, M.; MURALIKRISHNA, I. V. & DEEKSHATULU, B. L. (2005): Data Fusion Performance Analysis based on Conventional and Wavelet Transform. In: *IGARSS 2005, Seoul*. CD-ROM.
- TSAI, V. J. D. (2004): Evaluation of Multiresolution Image Fusion Algorithms. In: *IGARSS 2004, Anchorage*, CD-ROM.
- XYDEAS, C. S.; PETROVIC, V. (2000): Objective Image Fusion Performance Measure. In: *Electronic Letters*, 36 (4): 308-309
- ZHANG, Y. (2002): A New Automatic Approach for Effectively Fusing LANDSAT7 Images and IKONOS images. In: *IGARSS 2002, Toronto*, CD-ROM.
- ZHANG, Y. (2004): Understanding Image Fusion. *PERS*, 70 (6): 657–661

„RaySense“: Ein neuartiges strahlenoptisches Verfahren zur absoluten 3D-Vermessung spiegelnder Freiform-Flächen für den Einsatz in der Qualitätssicherung

J. Bähr, U.W. Krackhardt, D. Dietrich

Zusammenfassung: RaySense ist ein neuartiges berührungsloses, rein optisches 3D-Messverfahren für spiegelnde Freiform-Oberflächen. Im Gegensatz zu bekannten Methoden, bei denen Messmuster über die reflektierende Oberfläche beobachtet werden, gibt es bei RaySense keine Einschränkungen bezüglich Schärfentiefe und Lichtausbreitung, da eine optische Abbildung prinzipiell entfällt. Weiterhin kann auf die bisher notwendige umfangreiche Kalibrierung verzichtet werden. Das Verfahren erlaubt eine speziell an den Prüfling angepasste Messbeleuchtung, was die industrielle Einsatzfähigkeit wesentlich erweitert.

Die spiegelnde Oberfläche wird mit einem tiefenscharfen Lichtmuster beleuchtet. Die Richtungs- und Ortsverteilung des Lichtmusters vor und nach der Reflektion wird von einer Detektionseinheit mit hoher Genauigkeit vermessen. Strahlenoptisch werden die Musterkomponenten vor und nach der Reflektion aufeinander zurückverfolgt. Damit kann nach dem Reflexionsgesetz die jeweilige Oberflächennormale für jeden Reflektionspunkt ermittelt werden.

Derzeit können Flächen von mehreren dm^2 bei einer Höhenauflösung im Submikrometerbereich vermessen werden. Durch entsprechende Lichtführung sind ebenso Komponenten in eingebautem Zustand innerhalb optischer (Sub-) Systeme vermessbar.

In unserem Beitrag werden Messprinzip sowie verschiedene Anwendungen industrieller Relevanz beschrieben.

1. EINFÜHRUNG

Für die Erfassung von Formdaten werden üblicherweise Laufzeitmessung, Laser-Triangulation oder Streifenprojektion verwendet [1-3]. Diese Methoden sind auf diffus streuende Objekte anwendbar. Für spiegelnde Oberflächen scheiden aber solche Verfahren, die die Oberfläche auf einen Detektor abbilden, aus.

Hier stellt die Deflektometrie [4] ein bildgebendes, d.h. nicht-scannendes Verfahren dar. Das Objekt wird hierbei strukturiert beleuchtet und statt des Objektes wird das Beleuchtungsmuster auf den Detektor abgebildet. Aus der Verformung des Musters nach Reflexion am Objekt schließt man auf die Normalenverteilung der Objektoberfläche. Wegen des Schrittes der optischen Abbildung bedingt dieses Verfahren, dass das Objekt sowohl bzgl. seiner relativen Positionierung zum Sensor wie auch bzgl. seiner Tiefenausdehnung innerhalb des Schärfentiefebereichs des abbildenden Systems bleiben muss. Zur Behebung der für Gradientenmessverfahren inhärenten Mehrdeutigkeit (dieselbe Richtung kann erzeugt werden durch unterschiedliche Oberflächennormalen an unterschiedlichen Tiefen) ist die Verwendung einer weiteren Inspektion aus einer anderen Richtung notwendig. Dies schlägt sich in einem erhöhten Aufwand hinsichtlich der Justage und Kalibration nieder.

Wir schlagen hier ein neuartiges Verfahren vor, das durch seine praktisch unbegrenzte Schärfentiefe substantielle Erleichterung bei der Justage, Kalibration und der Probeneinbringung bietet. Weiterhin ermöglicht es einen erweiterten Einsatzbereich hinsichtlich Probenform und lokaler Krümmung des Prüflings. Das Verfahren basiert auf der optischen Abtastung des Prüflings mittels eines Bündels von Lichtnadeln. Die Anordnung der Nadeln innerhalb des Bündels ist beliebig und der Tiefenverlauf des Bündels kann parallel, konvergent, divergent oder durch eine in weiten Grenzen beliebige Winkelverteilung ausgeführt sein. Damit ist eine bestmögliche Anpassung des Messaufbaus an spezielle Objektgeometrien möglich.

Der Tiefenverlauf einer einzelnen Lichtnadel weist eine minimale Divergenz auf und bietet damit einen Schärfentiefebereich von einigen Metern. Der Prüfling wird mit dem Strahlbündel beleuchtet und die reflektierten Strahlen durch einen flächenhaften Detektor (z.B. CCD-Kamera) erfasst. Geschieht diese Erfassung an mindestens zwei unterschiedlichen Abständen zum Prüfling, kann die Strahlrichtung einer jeden reflektierten Lichtnadel ermittelt werden.

2. FUNKTIONSPRINZIP

2.1 Kalibration

Der Verlauf des beleuchtenden Strahlbündels ist aus einem Kalibrationsschritt der Messapparatur bekannt. Dazu wird entsprechend der Abbildung 1a das Detektormodul, das aus einem diffus streuenden Schirm und einer fest verbundenen CCD-Kamera besteht, in verschiedenen Positionen in das Lichtmuster gefahren. Im gezeigten Aufbau beleuchten die Lichtnadeln den Schirm von hinten. An mindestens zwei verschiedenen Z-Positionen wird durch Intensitätsmessung Ort und Winkel jeder Lichtnadel vermessen.

2.2 Durchführung der Messung

Entsprechend Abbildung 1b werden die am Prüfling reflektierten Lichtnadeln mit demselben Detektormodul vermessen, wodurch sichergestellt wird, dass alle Aufnahmen im selben Koordinatensystem gemessen werden.

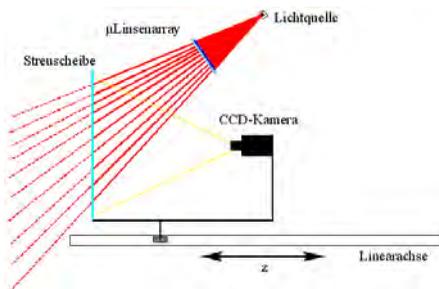


Abb. 1a: Schema der Kalibration

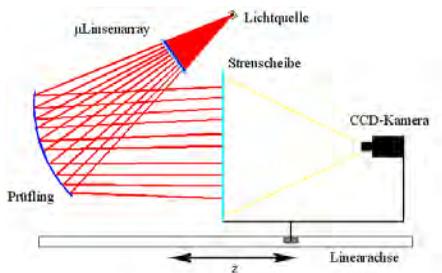


Abb. 1b: Durchführung der Messung

2.3 Ermittlung des lokalen Reflektionspunktes

Jede reflektierte Lichtnadel wird in Kenntnis ihres Auftreffortes auf dem Detektor und der ermittelten Strahlrichtung in Richtung Prüfling numerisch zurückverfolgt. Bei Abwesenheit von Messfehlern oder Rauschen lässt sich jeweils ein exakter Schnittpunkt einer reflektierten Lichtnadel mit einer beleuchtenden Lichtnadel finden. Die Winkelhalbierende zwischen beiden Strahlen ergibt die Flächennormale der reflektierenden Oberfläche am Ort des Schnittpunktes der Lichtnadeln. In realen Messungen schneiden sich die Geraden nicht exakt, sondern verlaufen i.d.R. windschief. Der theoretische Schnittpunkt wird dann praktisch als Ort des geringsten Abstandes zweier windschiefer Geraden zueinander ermittelt, was sich analytisch berechnen lässt.

Die Höhendaten können aus der Normalenverteilung durch Standardverfahren gewonnen werden, wie sie aus der Literatur bekannt sind [5].

Grundsätzlich könnte das Höhenprofil $S(x, y)$ auch direkt aus den Schnittpunkten gewonnen werden. Allerdings weisen Ortsmessungen im Vergleich zu Gradientenmessungen eine geringere Genauigkeit auf: Durch die numerisch bedingte Diskretisierung des Raums ist der Ort des Schnittpunktes (minimaler Abstand windschiefer Geraden) nicht beliebig genau bestimmbar. Dieser Fehler wirkt sich umso stärker aus, je kleiner der zwischen beleuchtender und reflektierter Lichtnadel eingeschlossene Winkel ist. Bei der Messung von Richtungen hingegen kann der Einfluss der Diskretisierung sowohl durch die Numerik als auch durch den Detektor skaliert werden: Der Einfluss sinkt mit steigendem Abstand zwischen den Detektorebenen, an denen jeweils die Intensitätsverteilung des reflektierten Strahlbündels und damit die Strahlrichtungen ermittelt werden.

2.4 Ermittlung der lokalen Flächennormalen

Eine Lichtnadel ist definiert durch einen Fußpunkt und die Richtung im Raum. Mit den Richtungseinheitsvektoren \vec{e} und \vec{a} des einkommenden Beleuchtungsstrahls bzw. des reflektierten ausgehenden Strahls kann die Oberflächennormale \vec{n} am Ort der Reflexion ermittelt werden (Abbildung 2a):

$$\vec{n} = \frac{(\vec{a} - \vec{e})}{|\vec{a} - \vec{e}|} \quad (1)$$

Damit ergibt sich aus jedem Paar (homologer) Lichtnadeln eine Oberflächennormale \vec{n}_j , was schließlich zu einem Datensatz von Flächennormalen in einem Abtastungsraster führt, das dem Raster des beleuchtenden Strahlbündels entspricht. Hieraus kann dann mittels Standardverfahren [5] das Höhenprofil des Prüflings gewonnen werden.

2.5 Bestimmung der Strahlrichtung

Trifft eine Lichtnadel auf die Detektorfläche an der Position Z_j , wird dort ein Lichtfleck an der Stelle (x_j, y_j, z_j) wahrgenommen. Wiederholt man die Messung an der Detektorposition Z_2 , lässt sich die Strahlrichtung in der (x, z) -Ebene und die Strahlrichtung in der (y, z) -Ebene ermitteln (siehe Abbildung 2b):

$$\tan(\varphi) = \frac{x_i - x_j}{Z_i - Z_j}, \quad \tan(\vartheta) = \frac{y_i - y_j}{Z_i - Z_j} \quad (2)$$

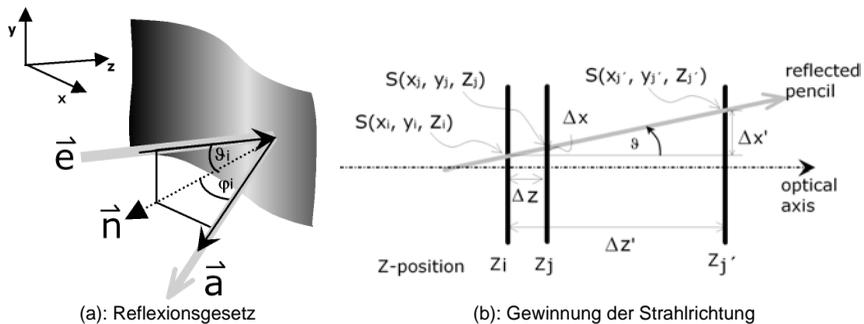


Abb. 2: Detektoreinheit (Großbuchstaben bezeichnen Weltkoordinaten, Kleinbuchstaben Koordinaten in der Detektorebene)

Offensichtlich kann die Winkelauflösung verbessert werden, indem $|Z_i - Z_j|$ erhöht wird, also der Abstand der Detektorpositionen. Andererseits wird es dann immer schwieriger die homologen Lichtflecke in unterschiedlichen Detektorebenen auch tatsächlich demselben Strahl zuzuordnen. Dadurch ergeben sich zunächst konkurrierende Vorgaben: $|Z_i - Z_j| \rightarrow \min$ für beste Zuordnung homologer Lichtflecke und andererseits $|Z_i - Z_j| \rightarrow \max$ für beste Winkelauflösung. Zur Auflösung dieses Dilemmas wird eine weitere Detektorposition Z_2 eingeführt mit (Abbildung 2b)

$$|Z_1 - Z_2| \ll |Z_1 - Z_3|. \tag{3}$$

Die Reihenfolge der Z-Positionen spielt dabei keine Rolle, solange die Auswertesoftware die Detektorsignale dem korrekten Z-Wert zuordnet.

2.6 Korrespondenz zwischen beleuchtenden und reflektierten Strahlen

Durchläuft man die Prozedur gemäß Abschnitt 2.2 ohne einen Prüfling im Sensoraufbau, erhält man die Richtungen der beleuchtenden Strahlen und damit eine Kalibration des Sensoraufbaus. Es ist also nicht nötig, jenseits des Messvorgangs eine separate Prozedur zur Kalibrierung durchzuführen.

Korrespondierende, d.h. homologe, Strahlen sind dadurch definiert, dass ihr Schnittpunkt auf der Oberfläche des Prüflings liegt. Physikalisch heißt das, dass der detektierte Strahl aus der Reflexion des homologen beleuchtenden Strahls hervorgeht. Die Korrespondenz von Strahlen aus dem reflektierten Bündel mit Strahlen aus dem beleuchtenden Bündel wird demzufolge dadurch gefunden, dass die Strahlen aus jedem der beiden Bündel mit einem gemeinsamen Z numerisch propagiert werden. Sobald sich zwei Strahlen schneiden, oder aber der geringste Abstand zweier windschiefer Geraden einen Minimalwert unterschreitet, handelt es sich um potentielle homologe Strahlen.

Dieses Verfahren kann je reflektiertem Strahl mehr als einen potentiellen homologen Beleuchtungsstrahl liefern: Wenn ein Strahl ein Strahlbündel durchdringt, kommt es in der Regel zu mehreren Schnittpunkten oder zumindest hinreichend kleinen Abständen, was zur Detektion mehrerer „Schnittpunkte“ führt (Abbildung 3a,b).

Zur Auflösung dieser Mehrdeutigkeit wird das Verfahren der Zuordnung durch statistische Kohärenz angewandt:

Für den Fall stetiger Oberflächen zeichnet sich die Menge der Schnittpunkte zwischen Beleuchtungsstrahlen und reflektierten Strahlen dadurch aus, dass sie die größte zusammenhängende Fläche im Raum darstellt. Es werden also zunächst alle Schnittpunkte zwischen dem Beleuchtungs- und dem Reflexionsbündel berechnet (Abbildung 3b). Daraus werden nur die Schnittpunkte ausgewählt, deren Gradient zum nächsten Nachbarn einen Schwellwert nicht überschreitet. Von den dadurch entstehenden Punktemengen wird die mit der größten Flächenüberdeckung ausgewählt.

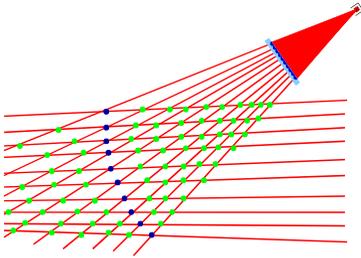


Abb. 3a: Mehrdeutige Schnittpunkte bei Messung in Anwesenheit von Rauschen



Abb. 3b: Mögliche Schnittpunkte bei einer realen Messung. Das größte zusammenhängende Gebiet markiert die tatsächliche Lage der Oberfläche

2.7 Analyse zur Messauflösung

Nimmt man an, dass der limitierende Einfluss auf die Tiefenauflösung von der Diskretisierung der Detektorfläche herrührt, lässt sich zunächst für die Winkelauflösung nach (2) schreiben:

$$\begin{aligned}
 \delta(\tan(\varphi))_x &= \left(\frac{d}{d\Delta x} \tan(\varphi) \right) \delta x = \frac{\delta x}{\Delta Z} & \delta(\tan(\vartheta))_y &= \left(\frac{d}{d\Delta y} \tan(\vartheta) \right) \delta y = \frac{\delta y}{\Delta Z} \\
 \delta(\tan(\varphi))_z &= \left(\frac{d}{d\Delta z} \tan(\varphi) \right) \delta z = -\frac{\delta Z}{\Delta Z} \tan(\varphi) & \delta(\tan(\vartheta))_z &= \left(\frac{d}{d\Delta z} \tan(\vartheta) \right) \delta z = -\frac{\delta Z}{\Delta Z} \tan(\vartheta) \\
 \delta \tan(\varphi) &= \sqrt{\frac{\delta x^2}{\Delta Z^2} + \frac{\delta Z^2}{\Delta Z^2} \tan^2(\varphi)} & \delta \tan(\vartheta) &= \sqrt{\frac{\delta y^2}{\Delta Z^2} + \frac{\delta Z^2}{\Delta Z^2} \tan^2(\vartheta)} \\
 &= \frac{1}{\Delta Z} \sqrt{\delta x^2 + \delta Z^2 \frac{\Delta x^2}{\Delta Z^2}} & &= \frac{1}{\Delta Z} \sqrt{\delta y^2 + \delta Z^2 \frac{\Delta y^2}{\Delta Z^2}}
 \end{aligned} \tag{4}$$

wobei $\tan(\varphi) = \frac{\Delta x}{\Delta Z}$, $\tan(\vartheta) = \frac{\Delta y}{\Delta Z}$, und δx der laterale Abstand zweier homologer Lichtflecke in unterschiedlichen Detektorebenen ist. δZ bezeichnet die entsprechende Verschiebung der Detektorebene. Schließlich ist die Quantisierung der Z-Verschiebung mit δZ und das Diskretisierungsraaster der Detektorebene mit $(\delta x, \delta y)$ bezeichnet.

Da das identische Verfahren bei der Kalibrierung zur Ermittlung der Richtungen der Beleuchtungsstrahlen verwendet wird, gilt auch dafür die zu (4) analoge Fehlerabschätzung. Da für

die Kalibrierung (k) wie für die Messung (m) derselbe Aufbau verwendet wird, kann man von gleichen Quantisierungen ausgehen, d.h. $(\delta x, \delta y, \delta Z)_k = (\delta x, \delta y, \delta Z)_m$. Allerdings ist davon auszugehen, dass für die Kalibrierung andere Z-Positionen des Detektors verwendet werden und damit auch die lateralen Abstände homologer Lichtflecke von denen der Messung abweichen, d.h. $(\delta x, \delta y)_k \neq (\delta x, \delta y)_m$. Wegen (4) ergibt sich als worst-case-Abschätzung für den Winkelfehler

$$\delta \tan(\varphi) = \sqrt{\delta x^2 \left(\frac{1}{\Delta Z_k^2} + \frac{1}{\Delta Z_m^2} \right) + \frac{\delta Z^2}{\Delta Z_k^4} (\Delta x_k^2 + \Delta x_m^2)}$$

$$\delta \tan(\vartheta) = \sqrt{\delta y^2 \left(\frac{1}{\Delta Z_k^2} + \frac{1}{\Delta Z_m^2} \right) + \frac{\delta Z^2}{\Delta Z_k^4} (\Delta y_k^2 + \Delta y_m^2)}$$
(5)

Abbildung 4a zeigt den Verlauf der erzielbaren Winkelauflösung als Funktion der Z-Verschiebung der Detektorebene und der Quantisierung dieser Verschiebung. Bei einem derzeitigen Messfeld von ca. 200 x 100mm ergibt sich eine effektive Pixelgröße auf dem Schirm von 130µm. Durch Messung in mehreren Ebenen und Mittelwertbildung erreicht man eine Subpixel-Auflösung von ca. 10. Durch Verwendung einer Servo-Achse kann eine Genauigkeit der Z-Positionierung von besser als 20µm erreicht werden. Um bei dieser Mess-Situation eine Höhenauflösung von 1µm zu erreichen, reicht eine maximale Z-Verschiebung von ca. 90mm aus. Bei einer Erhöhung der Z-Verschiebung auf 200-250mm erreicht man eine Höhenauflösung von weniger als 0,1µm, was in etwa interferometrischer Auflösungsleistung entspricht.

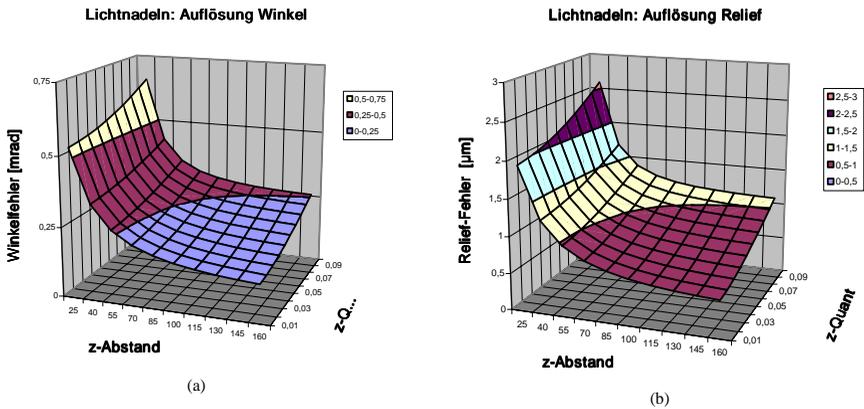


Abb. 4: Simulierte Auflösungsgrenzen (Parameter siehe Text)

Die Auflösung der Höhenwerte kann aus einer lokalen Taylor-Entwicklung des Höhenprofils $S(x, y)$ gewonnen werden:

$$S(x, y) \approx S(x_0, y_0) + \vec{\nabla} S(x_0, y_0) \cdot (\partial x, \partial y)$$
(6)

wobei $(\delta x, \delta y)$ die Schrittweite zwischen benachbarten Flächennormalen auf der Objektoberfläche bezeichnet. Da (φ, ϑ) die Strahlrichtung bzgl. der Z-Achse bezeichnet und andererseits $\vec{\nabla}S$ den Tangens des Winkel in x- bzw. y-Richtung bezüglich der (x,y)-Ebene des Objektes angibt, gilt:

$$\vec{\nabla}S = (\tan(\varphi), \tan(\vartheta))$$

Setzt man die in (4) gefundenen Formen für die Winkelfehler zusammen mit

$$\vec{\nabla}S = \vec{\nabla}S_0 \pm \frac{1}{2}(\delta \tan(\varphi), \delta \tan(\vartheta)) \text{ in (5) ein, ergibt sich}$$

$$\begin{aligned} S(x, y) &= S_0(x, y) \pm \frac{1}{2}\delta S(x, y) \\ \delta S(x, y) &= (\delta \tan(\varphi), \delta \tan(\vartheta)) \cdot (\delta x, \delta y) \end{aligned} \quad (7)$$

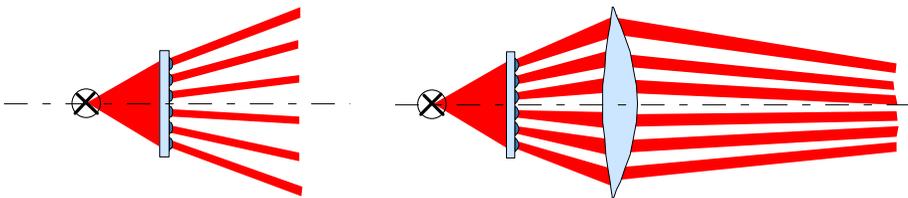
wobei $S_0(x,y)$ das fehlerfreie Höhenprofil bezeichnet. Die Schwankung δS um das fehlerhafte Höhenprofil ist in Abbildung 4b dargestellt.

3. SENSORAUFBAU

3.1. Lichtquelle und Strahlformung

Die Lichtnadeln werden erzeugt durch eine möglichst punktförmige Lichtquelle und ein μ -Linsen-Array (Abbildung 5). Jede μ -Linse erzeugt einen kollimierten Teilstrahl, die Lichtnadel. Die Öffnung des Bündel von konvergent über parallel bis divergent, wird mittels einer nachgeschalteten Makrolinse erzeugt. Dabei wird die Lage des μ -Linsen-Arrays so gewählt, dass auch in Anwesenheit der Makrolinse in guter Näherung kollimierte Lichtnadeln vorliegen.

Die μ -Linsen weisen typische homogene Brennweiten von 50-150mm auf, was Schärfentiefen von mehreren Metern zur Folge hat. Die Form einer jeden μ -Linse ist hexagonal oder kartesisch, womit sich ein Füllfaktor des Arrays von 100% erzielen lässt und damit praktisch kein Störlicht von der Beleuchtungseinheit ausgeht (maximale Effizienz). Die verwendeten Mikrolinsen wurden entsprechend der MSI-Methode der Firma SMOS durch Silber-Natrium Ionenaustausch hergestellt [6].



(a) divergenter Verlauf

(b) konvergenter Verlauf der Lichtnadeln

Abb. 5: Realisierung der tiefenscharfen Lichtmuster durch Kollimation einer Punktlichtquelle mittels eines Mikrolinsenarrays

3.2. Detektoreinheit

Die Detektoreinheit besteht aus einem semi-transparenten Schirm und einer CCD-Kamera. Der Schirm ist plan und mit seiner Normalen parallel zur Z-Achse entlang Z verschiebbar montiert. Beim Kameraobjektiv handelt es sich um ein Messobjektiv mit einer Vergrößerung von 20 und einer Verzeichnung von weniger als 0,1% gemessen über die Bilddiagonale.

Damit wird eine effektive Pixelgröße auf dem Schirm von typischerweise 100µm erreicht. Schneidet eine Lichtnadel die Schirmebene, detektiert die Kamera einen Lichtfleck. Die Position des Lichtflecks wird mittels Schwerpunktfindung im sub-Pixel-Genauigkeit (typischerweise Faktor 4-8) ermittelt. Durch Mittelwertbildung von mehreren Messebenen kann ohne weiters eine sup-Pixel-Genauigkeit von 10 erreicht werden.

4. EXPERIMENT

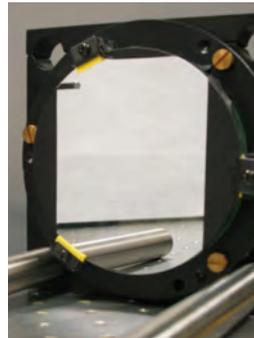


Abb. 6a: Prüfling: Hohlspiegel mit einer Brennweite von $f=900\text{mm}$ bei einem Durchmesser von 10cm

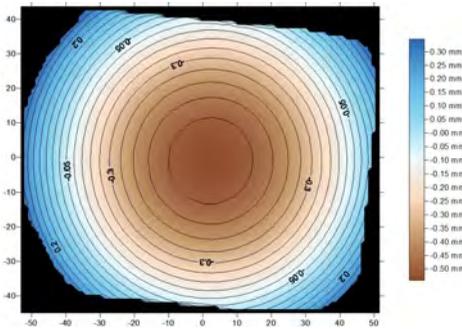


Abb. 6b: Rekonstruktion: Isohöhenlinien des Hohlspiegels

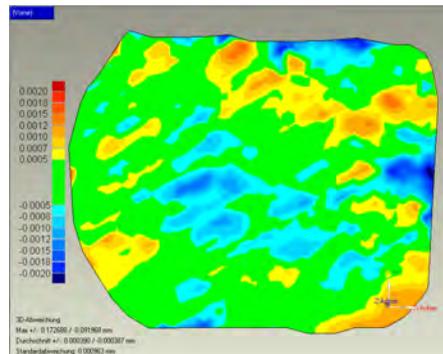


Abb. 6c: Höhenfehler als Differenz zwischen zwei Aufnahmen bei unterschiedlicher Probenposition

Zu Demonstrationszwecken wurde ein Konkavspiegel mit Durchmesser $d=100\text{mm}$ bei einer Brennweite von 900mm vermessen (Abbildung 6a, b).

Die Daten des Messaufbaus sind: Messfelddurchmesser 100mm , effektive Pixelgröße $130\mu\text{m}$, lateraler Abstand der Lichtnadeln (Sampling-Distanz) $2,0\text{mm}$, maximale Z-Verschiebung der Messebenen ist 90mm . Es konnte eine Höhenabweichung zwischen zwei Messungen desselben Prüflings unter leicht veränderter Position von etwa $1\mu\text{m}$ erreicht werden (Abbildung 6c).

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Es wurde gezeigt, das die vorgeschlagene Methode, spiegelnde Flächen mittels Bündeln aus Lichtnadeln zu vermessen, ein hochgenaues und zuverlässiges Verfahren darstellt. Die erzielte Auflösung reicht dabei in den Bereich von μm und darunter, womit an die Auflösung von Interferometern angeknüpft werden kann. Allerdings ist das vorgeschlagene Verfahren weit weniger anfällig gegen Umwelteinflüsse, da kein Referenzstrahl verwendet wird und kein kohärentes Licht nötig ist.

Die Erweiterungen des Verfahrens sind vielfältig: Es wurden bereits transparente Spiegelträger, also vor der Aufdampfung der Metallschicht, erfolgreich in Reflexion vermessen. Weiterhin lassen sich an die lokale Objektkrümmung angepasste Bündelgeometrien für die Beleuchtung realisieren. Für aufwendige Beleuchtungsaufgaben kann die Beleuchtung aus mehreren Beleuchtungsmodulen zusammengesetzt werden und damit zum einen eine bessere Anpassung an den Prüfling erzielt werden und zum anderen das Messfeld weiter vergrößert werden. Die Zuordnungsverfahren zwischen reflektierter und ursprünglicher Lichtnadel können durch individuelle Kodierung der Lichtnadeln (z.B. Zeit- oder Wellenlängenkodierung) erweitert werden.

Schließlich lässt sich das Messfeld in weiten Grenzen vergrößern, bspw. unter Verwendung divergenter Beleuchtungsbündel und Wahl eines hinreichend großen Arbeitsabstands in Verbindung entsprechend starker Lichtquellen bzw. empfindlicher Detektoren.

Diesbezügliche Arbeiten sind Gegenstand aktueller Entwicklungen und werden in nachfolgenden Arbeiten veröffentlicht. Das Verfahren ist unter dem Aktenzeichen 10 2005 007 244.5 geschützt.

LITERATUR

1. R. LANGE et al.: "Time-of flight range imaging with a custom solid-state image sensor", Proc. of the SPIE, Vol. 3823, pp. 180-191, Munich, (1999)
2. W. JÜPTNER, Z. FÜZESSY, W. OSTEN: „Simulation and Experiment in Laser Metrology“, ISBN 3-527-40142-3, Wiley-VCH, (1996)
3. J.-M. NIVET, K. KÖRNER, U. DROSTE, M. FLEISCHER, H. J. TIZIANI, W. OSTEN: "Depth-scanning fringe projection technique (DSFP) with 3-D calibration", Proc. SPIE 5144 , 443-450 (2003),
4. D. PÉRARD, J. BEYERER: "Three-dimensional measurement of specular free-form surfaces with a structured-lighting reflection technique", Proc. SPIE 3204, 13-17 (1997)
5. W.H. SOUTHWELL: "Wave-front estimation from wave-front slope measurements", JOSA Vol. 70, No 8, 998-1006 (1980)
6. J. BÄHR, U. KRACKHARDT, K.-H. BRENNER: „Fabrication and Testing of planar Micro Lens Arrays by Ion Exchange Technique in Glass“, in Proceedings of SPIE, Micro- and Nano-optics for Optical Interconnection and Information Processing, eds. M.R. Taghizadeh, H. Thienpont, G.E. Jabbour, Vol. 4455, pp.281 – 292, SPIE 46. Annual Meeting, San Diego, USA (2001)

Integration automatisierter Verfahren der digitalen Bildverarbeitung in einem Stereoauswertesystem

FRANK HENZE ¹, GUNNAR SIEDLER ² & SEBASTIAN VETTER ³

Zusammenfassung: Ziel der hier vorgestellten Arbeiten ist die Kombination photogrammetrischer Auswerteverfahren und digitaler Bildverarbeitung für ein anwendungsnahes System zur stereoskopischen Auswertung im Bereich Architektur, Bauforschung und Archäologie. Die stereoskopische Betrachtung am Computer ermöglicht dem Anwender die Wahrnehmung und Beurteilung der räumlichen Gestalt und Oberflächenstruktur von Objekten. Durch die Integration automatisierter Verfahren der digitalen Bildverarbeitung kann darüber hinaus die interaktive stereoskopische Bildauswertung vereinfacht und die Auswertegenauigkeit verbessert werden. Aufgrund der Ähnlichkeit stereoskopischer Bildpaare bieten sich hier Korrelationsverfahren zur subpixelgenauen Messung zugehöriger Bildpunkte an. Bereits im Zuge der Bildorientierung können damit natürliche Objektpunkte genutzt werden, so dass auf eine Signalisierung von Referenzpunkten am Objekt weitgehend verzichtet werden kann. Der stereoskopische Messvorgang wird mit einer automatisierten Tiefenfindung durch Bildkorrelation für den Anwender erheblich vereinfacht. Neben der Einzelpunktmessung können damit über geeignete Expansionsalgorithmen auch Profile und Objektoberflächen automatisch erfasst werden. Eine Schnittstelle für das codierte tachymetrische Aufmaß sowie die Integration von Punktwolken von Laserscannern erlauben eine kombinierte Auswertung. Mit Hilfe des implementierten Triangulationsalgorithmus können daraus digitale Oberflächenmodelle generiert und im Stereomodell bearbeitet werden. In Kombination mit dem zumeist hochaufgelösten Stereobildmaterial können damit qualitativ hochwertige Abwicklungen, Orthobilder oder texturierte 3D-Modelle für Visualisierung und Präsentation erzeugt werden. Durch Berücksichtigung verschiedener Ansätze für die Kameramodellierung können für die stereoskopischen Aufnahmen neben klassischen Messkamern auch analoge und digitale Amateur- sowie Panoramakameras zum Einsatz kommen..

1 Einleitung

Die Dokumentation kulturhistorisch wertvoller Objekte mit photogrammetrischen Verfahren hat für die Bereiche Archäologie, Bauforschung und Denkmalpflege nach wie vor eine große Bedeutung. Die bildhafte Dokumentation bietet gegenüber diskreten Messverfahren, wie Handaufmaß, Tachymetrie oder Laserscanning, den großen Vorteil einer kontinuierlichen Abbildung der sichtbaren Objektoberfläche in einer sehr hohen Auflösung zum Zeitpunkt der Aufnahme. Sie entspricht einer weitgehend interpretationsfreien Objekterfassung. Bei entsprechender Archivierung können fotografische Aufnahmen auch für spätere photogrammetrische Auswertungen als originäre Messdaten verwendet werden.

Die projektive Entzerrung hat sich mit der Bereitstellung anwendungsnaher Software als ein einfaches Verfahren für 2D-Dokumentationen für Auswertung und Kartierung etabliert. Das Verfahren ist jedoch bei nicht ebenen Objektoberflächen ungeeignet, so dass hier nach wie

¹ Dipl.-Ing. Frank Henze, Lehrstuhl für Vermessungskunde, BTU Cottbus, 03046 Cottbus,

e-mail: frank.henze@tu-cottbus.de

² Dipl.-Ing. Gunnar Siedler, fokus GmbH Leipzig, Lauchstädter Str. 20, 04229 Leipzig,

e-mail: home@fokus-gmbh-leipzig.de

³ Dipl.-Inf. (FH) Sebastian Vetter, fokus GmbH Leipzig, Lauchstädter Str. 20, 04229 Leipzig,

e-mail: home@fokus-gmbh-leipzig.de

vor klassische geodätische Messverfahren oder Handaufmaßtechniken zum Einsatz kommen. Weiterführende photogrammetrische Verfahren zur räumlichen Auswertung von Objekten (Mehrbildauswertung) werden auf Grund ihrer Komplexität von den Anwendern nur selten eingesetzt.

Mit Hilfe der Stereophotogrammetrie können nicht-ebene Objekte und Freiformoberflächen dreidimensional dokumentiert und auch zu einem späteren Zeitpunkt ausgewertet werden. Der Betrachter kann das aufgenommene Objekt räumlich wahrnehmen und erhält so Informationen über Oberflächenzustand, Bearbeitungsqualität und Tiefengliederung. Der anwendungsnahe Einsatz der Stereophotogrammetrie und der Bildverarbeitung in baugeschichtlich-archäologischen Projekten ist ein Forschungsschwerpunkt am Lehrstuhl für Vermessungskunde der BTU Cottbus. Die hier vorgestellten Arbeiten basieren auf einer langfristigen Kooperation des Lehrstuhls mit der fokus GmbH Leipzig. Ein großer Teil der entwickelten Algorithmen entstand im Rahmen des Verbundprojektes "Integriertes 3-D Panoramamesssystem" für die kombinierte photogrammetrische Auswertung von digitalen Panoramabildern und Laserscandaten (TU Dresden (IPF), KST Pirna und fokus GmbH Leipzig).

2 Integration von Bildzuordnungsverfahren

Bildzuordnungsverfahren spielen in der digitalen Photogrammetrie eine große Rolle bei automatisierten Auswerteprozessen und eignen sich insbesondere aufgrund der Ähnlichkeit stereoskopischer Bildpartner für eine Integration in ein Stereoauswertesystem.

Die manuelle stereoskopische Auswertung kann bei wenig erfahrenen Anwendern sehr schnell zu falschen Ergebnissen bei der Tiefenmessung führen, so dass der Auswerteprozess als zu schwierig empfunden und damit das gesamte Verfahren verworfen wird. In einer ersten Stufe wurde daher zunächst eine unterstützende Tiefenmessung über Bildkorrelation realisiert, die ein sicheres Aufsetzen der Messmarke auf der Objektoberfläche ermöglicht. In Anlehnung an das als Vertical Line Locus bezeichnete Verfahren (COGAN & HUNTER) werden entlang einer orthogonal zur aktuellen Projektionsfläche verlaufenden Geraden für diskrete Punkte im Objektraum in einem festgelegten Abstand Δh die zugehörigen Positionen in den digitalen Bildern bestimmt. Der Schnittpunkt der Geraden mit der Objektoberfläche wird aus den Bildkoordinaten mit der größten Ähnlichkeit zwischen beiden Bildfenstern berechnet. Als Ähnlichkeitsmaß kann der normierte Kreuzkorrelationskoeffizient zwischen den jeweiligen Bildausschnitten berechnet werden (siehe u.a. PIECHEL, 1991). Dieser liefert zunächst die Position der besten Übereinstimmung beider Bildausschnitte auf ein Pixel genau.

Die subpixelgenaue Lokalisierung erfolgt anschließend mit Hilfe einer Kleinste-Quadrate-Anpassung (siehe u.a. ACKERMANN, 1984, FÖRSTNER, 1982, GRUEN, 1996), bei der aus den Grauwertdifferenzen zwischen Muster- und Suchmatrix die Parameter einer geometrischen und radiometrischen Transformation zwischen beiden Bildausschnitten bestimmt werden. Insbesondere bei größeren perspektiven Unterschieden zwischen Muster- und Suchbild liefert dieses Verfahren eine verbesserte Zuordnung und erlaubt darüber hinaus statistische Aussagen über die erreichte innere Genauigkeit der Anpassung.

Modellorientierung

Durch Berücksichtigung verschiedener Ansätze für die Kameraorientierung sollen für die Aufnahme und Orientierung der Stereomodelle neben klassischen Messkammern auch analo-

ge und digitale Amateur- sowie digitale Rotationszeilenkameras zum Einsatz kommen können. Die Orientierung erfolgt in drei Schritten über die innere Orientierung, die relative Orientierung der Bilder sowie die absolute Orientierung.

Bei der relativen Orientierung werden aus den homologen Bildstrahlen zweier Bilder zunächst Orientierungselemente in einem Modellsystem berechnet. Die Messung identischer Bildpunkte in beiden Aufnahmen wird dabei durch die integrierte Bildkorrelation erheblich vereinfacht. Der Anwender ist nicht mehr auf die Messung markanter oder gar signalisierter Verknüpfungspunkte festgelegt, sondern kann vielmehr interaktiv eine optimale Punktverteilung ausschließlich über natürliche Objektpunkte erreichen. Beim manuellen Messvorgang werden hierzu in einem der beiden Bilder Punkte mit genügend Texturinformation in der Punktumgebung gemessen. Im Bildpartner werden bis zur Berechnung erster Orientierungsdaten zugehörige Suchbereiche für die Bildkorrelation zunächst manuell zugewiesen, danach kann der Suchbereich mit Hilfe der Epipolargeometrie als schmales Band definiert werden.

Im Anschluss an die relative Orientierung wird das Modellsystem über Passpunkte ins Objektkoordinatensystem transformiert oder mit Hilfe von Referenzstrecken auf einen Objektmaßstab skaliert. Als Referenzstrecke kann hier auch die bekannte Aufnahmebasis bei Verwendung einer Basisschiene dienen, so dass im Objektraum keinerlei Referenzinformationen eingebracht werden müssen. Somit können maßstäbliche Auswertungen auch von unzugänglichen Objekten einfach erstellt werden. Alternativ dazu können die Einzelbilder auch durch räumlichen Rückwärtseinschnitt orientiert werden.

Die Messung von signalisierten Passpunkten wird in verschiedenen Varianten unterstützt. Während kreisförmige Punktmuster mit Hilfe von Schwerpunktverfahren subpixelgenau detektiert werden, erfolgt die automatische Messung kreuzförmiger Muster, wie sie bei Segmentmarken oder Reséaukreuzen vorkommen, durch Anwendung des Ringoperators (LUHMANN, 1986).

Die Parameter der inneren Orientierung für die verwendete(n) Kamera(s) sollten im Vorfeld durch eine Kalibrierung mit einem Testfeld bestimmt werden oder, bei geeigneter Objektgeometrie, über räumlichen Rückwärtseinschnitt näherungsweise vor Ort ermittelt werden.

Abweichend von der Bildorientierung zentralperspektiver Aufnahmen ist die Modellorientierung von Bildern digitaler Rotationszeilenkameras. Die Panoramabilder werden zuerst über Rückwärtseinschnitt photogrammetrisch orientiert. Im zweiten Schritt erfolgt die Umrechnung des ausgewählten Bildbereiches auf die Zentralperspektive (Tangentialbild). Dabei werden die Kameraparameter berücksichtigt und ein korrigiertes Stereobildpaar mit paralleler Aufnahmerichtung übergeben (SCHNEIDER, 2003). Ohne Kenntnis der erweiterten Kameraparameter können die Tangentialbilder auch ohne Orientierungsdaten berechnet werden und über die relative und absolute Orientierung die Stereomodelle erstellt werden.

3 Aufnahmesysteme

Digitale Spiegelreflexkameras bieten eine gute Kombination aus hoher Sensorauflösung, guter Objektivqualität und hinreichender geometrischer Stabilität. Im Bezug auf die erreichte Bildauflösung können diese Kameras bereits mit analogen Mittelformatkameras konkurrieren. Im Idealfall stehen analoge, großformatige Messkamern zur Verfügung. Verschiedene Untersuchungen haben auch die prinzipielle Eignung kompakter digitaler Zoomkameras für die photogrammetrische Auswertung aufgezeigt (u.a. HASTEDT, LUHMANN, TECKLEBURG,

2004). Aufgrund der instabilen inneren Orientierung dieser Kameras ist der praktische Einsatz in den genannten Anwendungsbereichen bezüglich der erreichbaren Genauigkeit nicht zu empfehlen.

In Anlehnung an bekannte Stereomesskamern mit fester kalibrierter Basis kann über eine einfache Basisschiene (siehe Abb. 1) ein definierter Abstand für beide Kamerastandorte realisiert werden. Die Verwendung einer solchen Basisschiene ermöglicht mit nur einer Kamera eine Aufnahmeconfigurationen, die dem genäherten Stereonormalfall entspricht. Über die bekannte Basis kann das Modellsystem einer relativen Orientierung ohne zusätzliche Passinformationen in den Objektraum skaliert werden. Kleinere Objekte, wie einzelne Bauteile, Bauornamentik oder archäologische Fundstücke, können somit ohne zusätzlichen Messaufwand für Passpunkte vor Ort schnell dokumentiert und später maßstabsgerecht ausgewertet werden.

Alternativ dazu können am Objekt eine Maßstableiste oder ein Rahmen mit vorher bestimmten 3D-Koordinaten aufgestellt werden. Auf diese Weise können die Modelle der verschiedenen Ansichten in einem Koordinatensystem absolut orientiert werden.



Abb. 1: Aufnahmeconfiguration vor Ort
(links: Kameraschiene als Basis, rechts: Rahmen als 3D-Maßbezug)

4 Automatisierte Messung von Punktwolken und Schnittprofilen

Über Matching-Algorithmen können ähnliche Strukturen in digitalen Bildern automatisch bestimmt werden, wobei ein Bild als Referenz- und das andere als Suchbild dient. Für die Zuordnung wird die Grauwertstruktur des Referenzbildes im näherungsweise bestimmten Suchbereich des Suchbildes zunächst mit Hilfe des normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten (auch Produktmomentkorrelation - PMK) analysiert. Die hiermit gefundene pixelgenaue Position wird im zweiten Schritt über eine Kleinste-Quadrate-Korrelation (KQK) im Subpixelbereich verbessert. Mit den bekannten Orientierungsparametern der Bilder kann über den räumlichen Vorwärtseinschnitt die 3D-Koordinate im Objektraum berechnet werden.

Ausgehend von einem Startpunkt erfolgt über einen Expansionsalgorithmus die Generierung einer Punktwolke auf der Objektoberfläche. In Abhängigkeit der Bildauflösung und der Ob-

jektstruktur kann der Anwender die Schrittweite und die Größe des Suchbereiches für das Matching definieren. Der auszuwertende Bereich im Stereomodell kann durch den Nutzer eingeschränkt werden. Die in Abb. 2 erzeugte Punktwolke eines Prunkkraters aus Baalbek / Libanon besteht aus 130.000 Punkten, deren Berechnung auf einem Standard-PC ca. 25 min in Anspruch nahm.

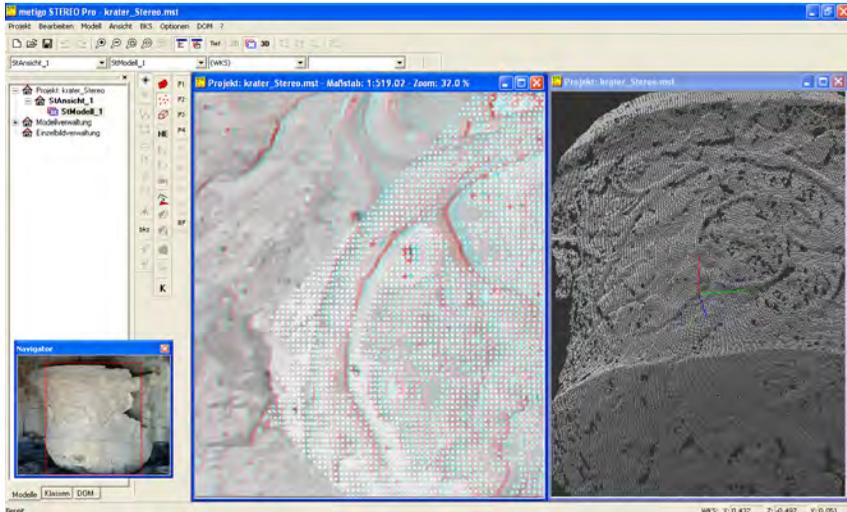


Abb. 2: Durch Matching erzeugte 3D-Punktwolke
(links: Anaglyphendarstellung im Stereoanzeigefenster, rechts: 3D Anzeigefenster)

Bei der Auswertung von Schnittprofilen werden durch den Anwender die Horizontalschnitte über die Höhe und die Vertikalschnitte über senkrechte Benutzerkoordinatensysteme definiert. Ähnlich der flächenhaften Auswertung von Objekten durch Matching wird bei den Profilen über einen Expansionsalgorithmus ein Schnittprofil des Objektes abgetastet. Alternativ dazu können über eine freie ASCII- und STL- Schnittstelle Daten von 3D-Laserscannern in das Profil eingelesen werden, wobei über einen Koordinatenfilter nur die Punkte Verwendung finden, die in einem bestimmten Toleranzbereich des Schnittprofils liegen.

Über einen Separierungsalgorithmus können Punkte zu Objekten gruppiert bzw. Ausreißer bereinigt werden (SCHELLER & SCHNEIDER, 2006). Mit einem Glättungsalgorithmus können der Profilverlauf generalisiert und Störungen aufgrund des Messrauschens korrigiert werden. Im zweiten Schritt werden die geglätteten Profile vektorisiert (BIENERT, 2006) und können schließlich über eine DXF-Schnittstelle direkt an ein CAD-System übergeben werden.

5 Triangulation von DOM

Auf der Grundlage der vorhandenen Punktwolke kann ein digitales Oberflächenmodell mittels Ball-Pivoting Algorithmus (BERNARDINI, 1999) generiert werden. Das Vorgehen dieses Algorithmus ist mit einer über die Oberfläche der Punktwolke rollenden Kugel vergleichbar. Diese Kugel besitzt einen festen Radius, welcher groß genug sein muss, um nicht durch die

Oberfläche der Punktwolke zu fallen. Ausgehend von drei Punkten, auf denen die Kugel zu Beginn aufliegt, wird die Kugel um zwei dieser Punkte geschwenkt, um einen neuen dritten Punkt zu finden. Somit rollt die Kugel solange auf der Oberfläche der Punktwolke entlang, bis keine neuen Dreiecke gefunden werden können. Aufgrund der ungleichen Verteilung der Punkte innerhalb einer Punktwolke kann nicht sichergestellt werden, dass diese mittels Ball-Pivoting Algorithmus und genau einem Kugelradius trianguliert werden kann. Zur Lösung dieses Problems wurde der Algorithmus so erweitert, dass Punktwolken mit unregelmäßiger Punktverteilung mit mehreren Radien trianguliert werden (VETTER, 2005).

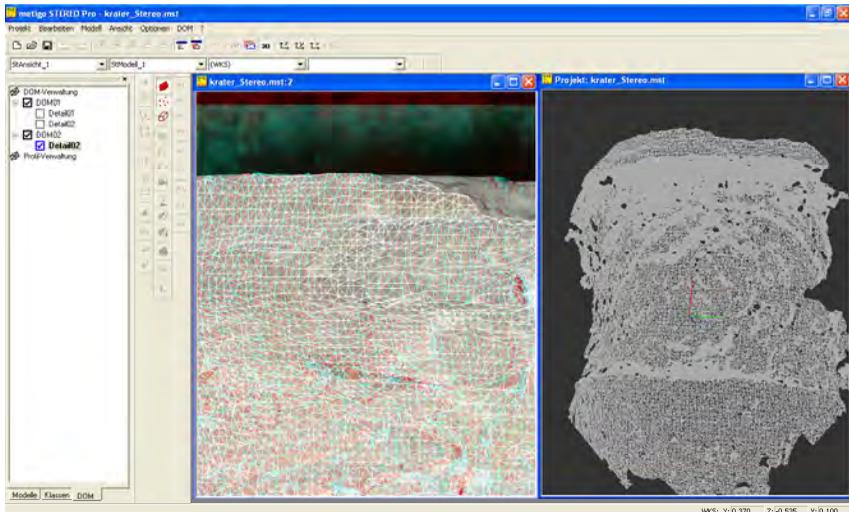


Abb. 3: Mit Ball-Pivoting Algorithmus trianguliertes Oberflächenmodell

Durch das Einblenden der Triangulation im Stereoanzeigefenster kann der Nutzer die Passgenauigkeit des Oberflächenmodells zum Objekt visuell kontrollieren.

6 Texturierung von Punktwolken und DOM

Für die Texturierung von Punktwolken und Dreiecksvermaschungen wurden verschiedene Ansätze realisiert. Punktwolken können auf der Grundlage der vorhandenen Bildinformation der orientierten Stereomodelle und orientierter Einzelbilder eingefärbt werden. Alternativ dazu können Einfärbungen über Distanzen, bezogen auf die Koordinatenebene oder den Scannerstandpunkt, generiert werden.

Bei der Texturierung der Dreiecksoberflächen auf der Grundlage der vorhandenen Bildinformation wurden die folgenden Prüfkriterien berücksichtigt: das Verschneiden des Bildstrahls mit der Objektoberfläche, der Abgleich der Flächennormale eines Dreieckes mit der Aufnahmeorientierung der Kameras sowie die Berücksichtigung von Nachbarschaftsbeziehungen der Dreiecke. Zusätzlich kann der Benutzer in den ausgewählten Bildern Auswertebereiche für die Texturierung definieren und somit Verdeckungen und Bildstörungen ausschließen.

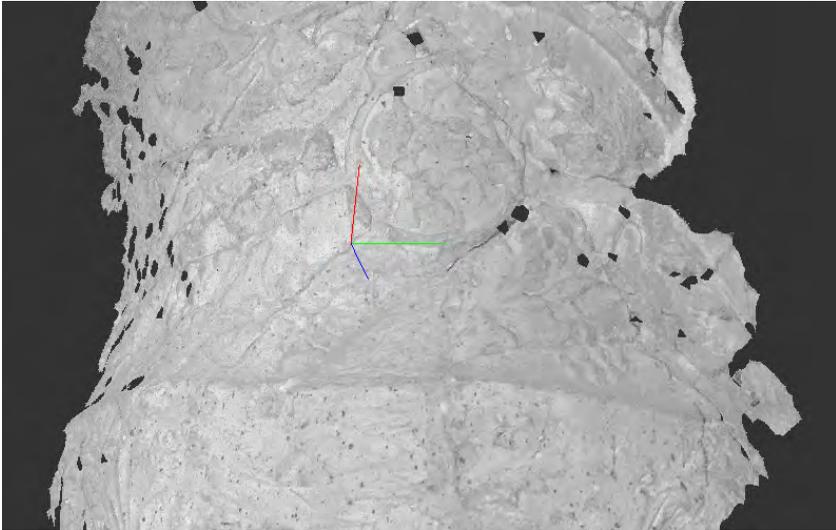


Abb. 4: Texturiertes Oberflächenmodell

7 Danksagung

Die Entwicklungsarbeiten im Rahmen des Verbundprojektes "Integriertes 3-D Panoramamesssystem" wurden gefördert durch Mittel des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) 2000 –2006.

Des Weiteren danken die Autoren Herrn Prof. Dr. K.-U. Jahn der HTWK Leipzig sowie Herrn Prof. Dr. H.-G. Maas und den Mitarbeitern des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Dresden.

Literatur

- ACKERMANN, F., 1984: Digital image correlation: Performance and potential application in photogrammetry. *Photogrammetric Record* 11 (64):429-439.
- BERNARDINI,F., MITTLEMAN,J., RUSHMEIER,H., SILVA,C., TAUBIN,G., 1999: The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction. *IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics*
- BIENERT, A. 2006: Glättung von aus Laserscannerpunktwolken extrahierten Profilen. *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik (Beiträge Oldenburger 3D-Tage 2006, Hrsg. Th. Luhmann), Verlag Herbert Wichmann, S. 214 - 221*
- COGAN, L., HUNTER, D., 1984: "Kern DSR1/DSR11: DTM Erfassung und der Kern Korrelator", Kern & Co AG, Aarau.
- FÖRSTNER, W., 1982: On the geometric precision of digital correlation, *IAPRS Vol. 24, No. 3*, pp. 176-189.

- GRUEN, A., 1996. Least squares matching: a fundamental measurement algorithm. In: K. Atkinson (ed.), *Close Range Photogrammetry & Machine Vision*, Whittles, pp. 217-255.
- GRUEN, A., ZHANG, L., VISNOVCOVA, J., 2001. Automatic Reconstruction and Visualization of a Complex Buddha Tower of Bayon, Angkor, Cambodia. *Proceedings 21. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Konstanz, 4-7 September 2001*, pp. 289-301
- HASTEDT, H., LUHMANN, T., TECKLEBURG, W., 2004: Modellierung hochauflösender digitaler Kameras im Hinblick auf ihre Verifizierung nach VDI/VDE 2634. Luhmann (ed.): *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der 3. Oldenburger 3D-Tage*, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- HENZE, F., 2000: Koordinatenbestimmung in stereoskopischen Bildpaaren für die Anwendung in der Nahbereichsphotogrammetrie. Diplomarbeit (unveröffentlicht), TU Berlin.
- LUHMANN, T., 1986: Ein Verfahren zur Rotationsinvarianten Punktbestimmung, Bildmessung und Luftbildwesen, Heft 4/1986, pp. 147-154
- PIECHEL, J., 1991: Stereobild-Korrelation. In: Bähr/Vögtle (Herausgeber): *Digitale Bildverarbeitung - Anwendung in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung*, Seiten 96-132. Wichmann Verlag, Heidelberg.
- SHELLER, S., SCHNEIDER, D., 2006: Extraktion von Primitiven aus Laserscannerpunktwolken zur Rekonstruktion von Tragwerken. *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik. Beiträge Oldenburger 3D-Tage 2006*, Hrsg. Th. Luhmann, Verlag Herbert Wichmann.
- SCHNEIDER, D.; MAAS, H.-G., 2003: Geometrische Modellierung und Kalibrierung einer digitalen hochauflösenden Rotationszeilenkamera. Luhmann, T. (Hrsg.): *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2003*. pp. 57-64, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- VETTER, S., 2005: Generierung digitaler Oberflächenmodelle (DOM) im Bereich der Architekturphotogrammetrie, Diplomarbeit (unveröffentlicht), HTWK Leipzig.

Kombination und Vergleich von digitaler Photogrammetrie und terrestrischem Laserscanning für Architekturanwendungen

THOMAS P. KERSTEN¹

Zusammenfassung: Dieser Beitrag beschreibt zwei Projekte der HafenCity Universität Hamburg, in denen zwei historische Gebäude durch digitale Architekturphotogrammetrie und terrestrisches Laserscanning erfasst und als 3D CAD-Gebäudevolumenmodell erstellt wurden. Dabei wurden einmal beide Verfahren zur Erfassung und Modellierung der Kirche in Raduhn (Landkreis Parchim in Mecklenburg-Vorpommern) im Vergleich eingesetzt, während zum anderen das Duderstädter Westerturmenensemble (Landkreis Göttingen in Niedersachsen) durch kombinierten Einsatz beider Verfahren rekonstruiert wurde. Für beide Projekte wurden die digitale Spiegelreflexkamera Fujifilm FinePix S2 Pro und der terrestrische Laserscanner Mensi GS100 eingesetzt. Die erforderlichen Arbeitsschritte von der Datenerfassung bis zur Visualisierung werden beschrieben und die erreichte Genauigkeit und der jeweilige Arbeitsaufwand werden dargestellt.

1 Einleitung

Für die 3D-Erfassung von Gebäuden stellt das terrestrische Laserscanning heute zunehmend eine echte alternative oder ergänzende Messmethode zur tachymetrischen Aufnahme oder zur digitalen Architekturphotogrammetrie dar. Dafür stehen je nach Anforderung hinsichtlich Genauigkeit, Reichweite, Detailreichtum und Messgeschwindigkeit verschiedene Laserscanner als Kamera- oder Panorama-View Scanner auf dem Markt zur Verfügung. Die Auswertung von tachymetrischen oder photogrammetrischen Daten zu 3D-Gebäudeformen ist heute eine bewährte Methode. Die photogrammetrische Erfassung und 3D-Modellierung von historischen Gebäuden z.B. mit der Software PICTRAN wurde in Publikationen der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (seit 1.1.2006 gehört das Department Geomatik zur neu gegründeten HafenCity Universität Hamburg) beschrieben: KERSTEN und ACEVEDO PARDO 2002 und KERSTEN et al. 2003. Eine Software-Lösung für die kombinierte Auswertung von Laserscanner- und Bilddaten mit dem Programm PHIDIAS der Firma PHOCAD, Aachen wird in BECKER und SCHWERMANN (2005) vorgestellt.

In diesem Beitrag werden die beiden Aufnahme- und Auswerteverfahren digitale Architekturphotogrammetrie und terrestrisches 3D-Laserscanning einmal kombiniert und einmal vergleichend betrachtet. In dem Projekt Westerturmenensemble Duderstadt wurden beide Verfahren in der Software PHIDIAS kombiniert eingesetzt, während im Projekt Kirche Raduhn beide Verfahren bei der Aufnahme und Objektrekonstruktion miteinander verglichen wurden. Die für die Auswertung und Modellierung notwendigen Arbeitsschritte werden mit Angaben über die Genauigkeit aufgezeigt, die Ergebnisse der virtuellen Objekte werden präsentiert und entsprechende Schlussfolgerungen werden aus Kombination und Vergleich beider Verfahren gezogen.

¹ HafenCity Universität Hamburg, Department Geomatik, Hebebrandstr. 1, 22297 Hamburg, e-mail: Thomas.Kersten@hcu-hamburg.de

2 Die Aufnahmeobjekte - Kirche in Raduhn und Duderstädter Westerturmensemble

Die Kirche (Abb. 1) befindet sich in dem kleinen Dorf Raduhn im Landkreis Parchim (Mecklenburg Vorpommern). Das Dorf wurde erstmals in einer Heiratsurkunde vom 23. November 1264 erwähnt, jedoch existieren keine weiteren Unterlagen über die Errichtung der Kirche. In den Jahren 1857 bis 1859 wurde die „alte Kirche“ unter Großherzog Friedrich Franz II komplett im neugotischen Stil umgebaut, der sich heute in den zahlreiche Spitzbögen der Fenster und Türen widerspiegelt. Die Mischung aus den zum Grossteil noch vorhandenen Felswänden und den Ziegelsteinen ist Zeitzeuge dieser gravierenden Umbaumaßnahme. An der Nord- und Ostfassade sind im Mauerwerk Bögen und zugemauerte Fenster als weitere Anzeichen einer ehemals erweiterten Kirche vorhanden. Das Gebäude umfasst einen Grundriss von ca. 7 x 8 Meter und eine Firsthöhe von etwa 15 Meter. Der Turm an der Westseite erreicht eine Höhe von 24 Meter. Heute befindet sich um die Kirche herum eine große Wiese, begrenzt durch eine ein Meter niedrige Trockenmauer.

Der Westerturm ist das Wahrzeichen der Stadt Duderstadt (Landkreis Göttingen) im südlichen Niedersachsen. Der Duderstädter Westerturm (ca. 35 m x 8 m x 52 m, siehe Abb. 1) ist der letzte, vollständig erhaltene Turm der mittelalterlichen Stadtbefestigung, der bereits am 16. Oktober 1343 als Niedertor erstmals urkundlich erwähnt wurde. Nach einem Brand im Frühjahr 1424 wurde der Westerturm vernichtet, aber kurze Zeit später als Steinbau wieder aufgebaut, wobei erst 1505 die Dachkonstruktion vollendet wurde, welche durch ihre spätere und gleichmäßige Drehung den Turm zum Wahrzeichen der Stadt machte. Wegen gravierender Schäden an der Holzkonstruktion des Daches wurde im Jahre 2002 eine grundlegende Sanierung des Turmes durchgeführt. Im Zuge dieser Sanierung wurde auch die Stadtmauer im alten Bachmann'schen Haus freigelegt und die Struktur der alten Hausfassade durch eine Glaskonstruktion ersetzt. Das so restaurierte Ensemble wurde am 12.08.2004 feierlich eingeweiht und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht.



Abb. 1: Kirche Raduhn (links) und Duderstädter Westerturmensemble, Front- (Mitte), Hinteransicht (rechts)

3 Die Aufnahmesysteme

Die Aufnahme der beiden Gebäude erfolgte mit einer handelsüblichen digitalen Spiegelreflexkamera Fujifilm FinePix S2 Pro und dem terrestrischen Laserscanning-System Mensi GS100. Die S2 besitzt einen CCD-Chip mit einer Sensorfläche von 23,3 mm x 15,6 mm, die eine maximale interpolierte Auflösung von 4256 x 2848 Pixel bietet, was einer Filegröße von

ca. 35 MB pro Bild in TIFF bedeutet. In dieser Auflösung können 28 Bilder auf einer Compact Flash Karte mit 1 GB Speicherkapazität gespeichert werden. Die Kamera wurde mit Nikkor-Objektiven mit der Brennweite 14 mm und 28 mm eingesetzt.

Das Trimble 3D-Laserscanning-System GS100 wird von Mensi S.A. in Frankreich hergestellt und besteht aus Messinstrument mit Zubehör und entsprechender Erfassungs- und Auswertesoftware. Die Streckenmessung erfolgt nach dem Impulslaufzeitverfahren mit einem grünen Laser mit 532 nm Wellenlänge. Die Genauigkeit der Einzelstrecke beträgt 6 mm. Die optimale Messentfernung des GS100 wird mit 2 – 100m angegeben. Durch die bestmögliche Winkelauflösung von 0,0018° lässt sich in 100m Entfernung eine Gitterweite von 3 x 3 mm realisieren. Der Panorama-View Scanner (360° horizontal, 60° vertikal) kann bis zu 5000 Punkte in der Sekunde messen, wobei ein Laserpunkt in 50m Entfernung 3mm groß abgebildet wird. Weitere technische Angaben und Abbildungen vom System sind in HÖNNIGER & KERSTEN (2005) aufgeführt. Die vollständigen technischen Daten sind unter MENSI (2004) zu finden.

4 Photogrammetrische Objektaufnahme und Laserscanning

Die Objektaufnahmen erfolgten in folgenden Arbeitsschritten: Passpunkt-signalisierung für die photogrammetrische Aufnahme und für das Laserscanning, geodätische 3D-Netzmessung und Passpunktbestimmung mit LEICA-Tachymetern, photogrammetrische Aufnahme und Laserscanning. Die Aufnahme der Kirche Raduhn erfolgte innerhalb eines Tages am 21. April 2004, während das Westerturmenssemble im Februar 2005 an drei Tagen aufgenommen wurde.

Als photogrammetrische Passpunkte dienten 45 Signale (Ø 25 mm) für die Kirche Raduhn und 49 Signale (Ø 50 mm) für den Westerturm, die am Objekt verteilt angebracht wurden. Aufgrund der Höhe des Westerturmes wurde eine fahrbare Drehleiter mit einer maximalen Arbeitshöhe von 28 m (Abb. 2) für die Passpunkt-signalisierung und für zusätzliche Aufnahmen mit der Kamera eingesetzt. Zur Verknüpfung und Georeferenzierung der Laserscanning-Punkt-wolken wurden beim Westerturm neun grüne Mensi-Targets und jeweils sechs Kugeln an der Turmwand und auf den Tachymeterstandpunkten verwendet, während bei der Kirche Kugeln auf den acht um die Kirche verteilten 3D-Netzpunkten platziert wurden. Beim Westerturm bestand das 3D-Netz wegen der Gebäudeanordnung und der Einbindung des Innenbereiches des Turmes und des Museums aus vier Teilnetzen mit insgesamt 12 Standpunkten, von denen die Passpunkte für Photogrammetrie und Laserscanning gemessen wurden. In einer Ausgleichung mit der Software PANDA (GeoTec, Laatzen) wurden die Netz- und Passpunkte mit einer Standardabweichung von besser als 1,5 mm (Westerturm) bzw. 3 mm (Kirche Raduhn) bestimmt. Der Außen- und Innenbereich des Westerturmenssembles wurde mit insgesamt 137 Bildern (mit maximaler Auflösung, 5 GB Bilddaten) aufgenommen, davon wurden für die spätere Auswertung und Kamerakalibrierung lediglich 58 Bilder verwendet. Dagegen konnte die Kirche Raduhn mit insgesamt 60 photogrammetrischen Aufnahmen (Auflösung jeweils 3040x2016 Pixel) mit einem Nikkor 14mm-Objektiv aus Augenhöhe aufgenommen werden, von denen später 51 Aufnahmen für die Auswertung verwendet wurden.

Mit dem Laserscanner GS100 wurden beide Objekte von fünf (Kirche) bzw. zehn Scannerstandpunkten (Westerturm) in einer Rasterweite von 20 mm bzw. 93 mm auf 10 m gescannt. Objektdetails wie Fenster oder Turmfigur wurden mit einer höheren Auflösung von 5 mm auf 10 m gescannt. Die Steuerung des Scanners erfolgte mit der Software PointScape, wobei die Selektion der Scanbereiche durch das Video-Framing erfolgte. Die jeweils sichtbaren Targets und Kugeln (angebracht an Turmwand und auf den Tachymeterstandpunkten) wurden für die spätere Verknüpfung und Georeferenzierung der Scans separat von jedem Standpunkt ge-

scannt und durch die Software als Passpunkte erkannt. Beim Scannen der Westerturmspitze stellte sich heraus, dass das schwarze Schieferdach das grüne Laserlicht kaum reflektierte, so dass dieses Gebäudeteil später allein durch die Photogrammetrie rekonstruiert werden musste. Für die Kirche wurden 12 Millionen Punkte erfasst, was einer Datenmenge von ca. 230 MB entspricht.



Abb. 2: Scanner und Kugel als Passpunkt vor der Kirche Raduhn (links), Drehleitereinsatz für Passpunktsignalisierung und photogrammetrische Aufnahme (Mitte), sowie Laserscannerstandpunkt beim Westerturm (rechts)

5 Datenauswertung

5.1. Registrierung und Geo-Referenzierung der Punktwolken

Für eine manuelle Registrierung und Geo-Referenzierung der Scans kam die Software Real-Works Survey 4.2 der Firma Mensi zum Einsatz. Jede Scannerstation wurde über drei bis sieben Targets und Kugeln mit den anderen verknüpft, wobei die Genauigkeit für die Registrierung der Punktwolken bei beiden Projekten zwischen 4 mm (Minimum) und 8 mm (Maximalwert) bei der jeweiligen Station lag. Die Geo-Referenzierung der gesamten Westerturm-Punktwolke erfolgte über 23 Passpunkte (6 Kugeln auf Netzpunkte, 9 Targets und 8 Kugeln an der Turmwand) mit einem RMS von 8,8 mm an den Passpunkten, was für die Objektrekonstruktion bei weitem ausreichte. Für die Punktwolke der Kirche erfolgte die Geo-Referenzierung dagegen in 3Dipsos mit einem RMS von 5,2 mm.

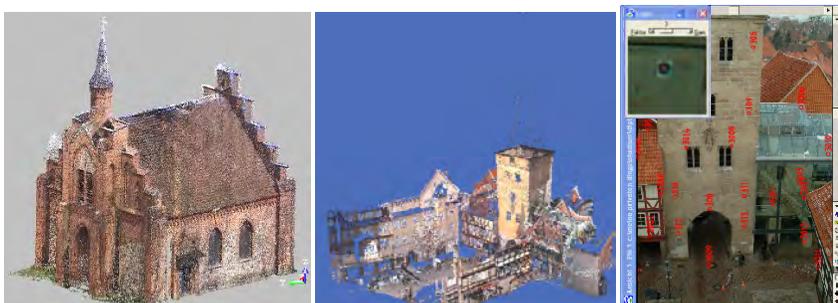


Abb. 3: Gesamte registrierte Punktwolke der Kirche Raduhn (links) und des Westerturmensembles (Mitte); Bild vom Westerturm mit Bildpunktmessungen (rechts)

Anschließend wurde die jeweilige gesamte Punktwolke (Abb. 3) noch bereinigt, in dem überflüssige Punkte, die nicht zu dem Objekt gehörten, gelöscht wurden. Für die Objektrekonstruktion wurden die auszuwertenden Bereiche in der Punktwolke segmentiert und als ASCII-File exportiert, um in PHIDIAS bzw. AutoCAD verarbeitet werden zu können.

5.2. Bildorientierung und Kamerakalibrierung

Vor der eigentlichen 3D-Auswertung erfolgten die Bildorientierung und Kamerakalibrierung. Dafür wurden 51 ausgewählte, digitale Bilder der Kirche Raduhn in einem Bildverband durch Bildpunktmessungen mit der Software PhotoModeler (Firma EOS Inc.) verknüpft und orientiert. Die Orientierung der 58 ausgewählten, digitalen Bilder des Westerturms erfolgte durch Bildpunktmessungen mit dem Programm PHIDIAS der Firma PHOCAD, Aachen. Abb. 3 (rechts) zeigt exemplarisch in einer rotierten Darstellung gemessene Bildpunkte und die Messung eines Passpunktes. Bei beiden Bildverbänden ist eine stabile Bildverknüpfung und eine zuverlässige Punktbestimmung gewährleistet, da im Durchschnitt 19 (Kirche) bzw. 12 Bildpunkte pro Bild (Westerturm) und jeder Objektpunkt durchschnittlich in 8 bzw. 6 Bildern gemessen wurden. Die Bildorientierungen wurden simultan mit der Kamerakalibrierung in beiden Softwarepaketen durch eine Bündelblockausgleichung bestimmt. Durch die Kalibrierung der Kamera wurden u.a. systematische Fehler durch die hohe Objektivverzerrung in der weiteren Auswertung kompensiert. Alle Bildpunkte konnten mit einer Bildmessgenauigkeit von $s_{xy} = 3,0 \mu\text{m}$ (Kirche) bzw. $4,8 \mu\text{m}$ (Westerturm) gemessen werden, was einer Genauigkeit von besser als einem halben bzw. einem Pixel entspricht. Die Standardabweichungen für die Objektpunktkoordinaten lagen in beiden Projekten bei 2 mm für die signalisierten Punkte und besser als 1 cm für alle natürlichen Punkte. Diese Ergebnisse bestätigen das hohe Genauigkeitspotenzial der digitalen SLR-Kameras für Anwendungen in der Architekturphotogrammetrie, das auch in anderen Projekten erreicht wurde (KERSTEN und ACEVEDO PARDO 2002 und KERSTEN et al. 2003).

5.3. Objektrekonstruktion durch getrennte Auswertung

Um das Potenzial der photogrammetrischen und der Laserscanning-Daten für eine 3D-Auswertung und Objektrekonstruktion der Kirche mit einander vergleichen zu können, wurden die orientierten Bildern in PhotoModeler und die segmentierten Punktwolken in 3Dipsos separat ausgewertet.

In PhotoModeler wurden die erforderlichen Objektpunkte in mindestens drei Bildern mit einer Standardabweichung von besser als 10 mm gemessen, wobei identische Objekte, wie z.B. Fenster oder Stuckbänder nur einmal detailliert gemessen und später als CAD-Kopie über einen gemessenen Einfügepunkt im CAD platziert wurden. Zur Erstellung des 3D-Volumenmodells wurden die Daten über ein DXF-File in AutoCAD importiert. Für ein übersichtliches Arbeiten mit AutoCAD wurden die unterschiedlichen Hauptelemente, wie Fassaden, Fenster, Pfeiler, Turm, Haupt- und Nebeneingang jeweils in separaten Dateien modelliert. Kleinere Objekte und Details, wie z.B. Dächer, Muster und Kreuze wurden direkt in den jeweiligen Dateien der zugehörigen Elemente konstruiert. Die einzelnen modellierten Objekte wurden anschließend zu einem gesamten Volumenmodell zusammengesetzt. Die Abb. 4 zeigt die Erstellung eines Fensters aus digitalen Bildern und ein Fensterdetail im Vergleich zu Laserscannerdaten. In Abb. 5 ist das detaillierte 3D-Modell (links), das aus photogrammetrischen Daten generiert wurde, dargestellt.

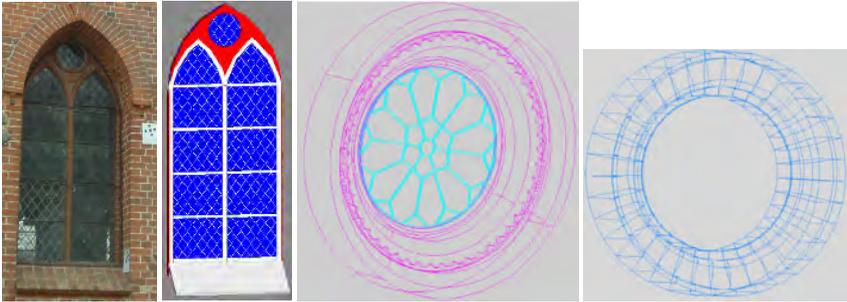


Abb. 4: Fenster der Kirche Raduhn als Bild und als Modell (links) und Fensterdetail aus digitalen Bildern und aus Laserscannerdaten erstellt (rechts)

Auf Grund der geometrischen Struktur des Gebäudes erfolgte die Modellierung der Punktwolken in 3Dipos überwiegend über Best-fit-Funktionen, d.h. die meisten Geometrielemente wurden über eine Approximation einer Ebene erzeugt. Dabei wurde in der segmentierten Punktwolke einer Fassade eine ausgleichende Ebene ohne Rahmenbedingungen gerechnet. Diese geometrischen Elemente wurden anschließend mit anderen Ebenen verschnitten. So konnten die Fassaden, die Dachelemente, die Pfeiler und Giebel generiert werden. Für die Seitenlaibung der Fenster wurden ausgleichende Ebenen rechtwinklig zu einer weiteren Ebene und für die Fensterwölbungen wurden ausgleichende Zylinder gerechnet. Die Verzierungen wurden mit dem geometrischen Element Torus modelliert, dessen Achse als Bedingung parallel zu einer weiteren Achse verläuft. Zur Erstellung des 3D-Volumenmodells wurden die modellierten Daten über ein DXF-File zu AutoCAD transferiert.

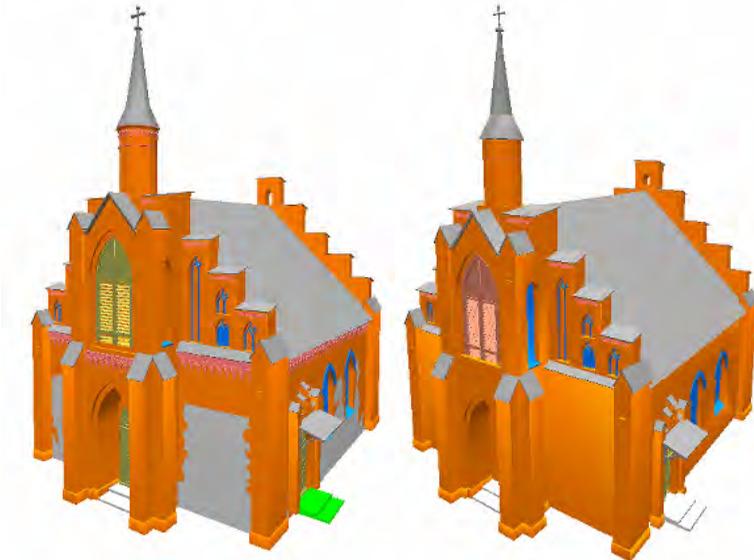


Abb. 5: Schattiertes Volumenmodell der Kirche Raduhn aus digitalen Bildern (links) und aus Laserscannerdaten erstellt (rechts)

Abb. 5 zeigt links das detaillierte, schattierte 3D-Volumenmodell der Kirche Raduhn, das aus digitalen Bildern erstellt wurde, im Vergleich zu dem Modell, das aus Laserscannerdaten (rechts) generiert wurde. Beide Modelle weisen Abweichungen zu tachymetrischen Kontrollmessungen von maximal 20 mm auf, wobei die Differenzen zwischen Photogrammetrie und Laserscanning auch in dieser Größe liegen. Bei diesen Streckenvergleichen haben jedoch die Punktidentifizierung und die Generalisierungen bei der Objektrekonstruktion auch einen Einfluss auf die Genauigkeit. Eine detaillierte Beschreibung der vergleichenden Rekonstruktion der Kirche Raduhn ist in HOFFMANN (2005) zusammengefasst.

5.4. Objektrekonstruktion durch kombinierte Auswertung

Die Objektrekonstruktion des Westerturmens ensembles wurde mit dem photogrammetrischen Auswertesystem PHIDIAS, das als eine Anwendung auf das CAD-System MicroStation aufgesetzt ist, durchgeführt. Durch die Kombination dieser Programme können die ermittelten Daten aus PHIDIAS direkt in MicroStation angezeigt und weiter bearbeitet werden. Zur photogrammetrischen Auswertung stehen acht Ansichtsfenster zur Verfügung, wobei hier aber maximal drei Bilder geladen wurden und dabei nur ein Bild zum Zeichnen im Vollbildmodus dargestellt wurde. Für eine präzise Punktmessung kann eine skalierbare Lupe geöffnet und der so ausgewählte Bereich vergrößert dargestellt werden. Die im ASCII-Format eingelesenen Punktwolken werden in ein internes Binärformat umgewandelt, um jedes weitere Einlesen dieser Daten zu beschleunigen und die Dateigröße zu verkleinern.

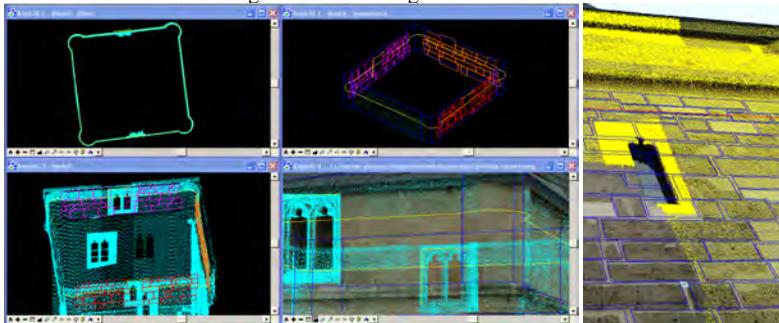


Abb. 6: Darstellung der Punktwolke in Kombination mit Bilddaten (links), Monoplotting der Steine im Bild und in der Punktwolke (rechts)

Das Monoplotting in PHIDIAS wird durch die Kombination von Bild- und Laserscanningdaten möglich. Dazu werden die Punktwolke und das dazugehörige Bild gleichzeitig am Bildschirm dargestellt (siehe Abb. 6 rechts). In einem ersten Schritt wird die Zeichnungsebene festgelegt, wobei darauf zu achten ist, dass die Koordinatenachsen rechtwinkelig auf der Gebäudeseite liegen, um eine spätere Einzelsteinauswertung zu vereinfachen. Die nötige Tiefeninformation wird nach Ebenenfestlegung aus der Punktwolke erhalten. Für die Einzelsteinauswertung wird die Punktwolke dann „ausgeblendet“. Das Zeichnen der Einzelsteine erfolgte für die volumenhafte 3D-Auswertung als „geschlossene Polygone“. Die Einzelsteine wurden bis über die eigentlichen Kanten des Gebäudes sowie über die Fenster und Durchfahrten gezeichnet, um nach der Auswertung aller Gebäudeseiten die exakten Ecken und Kanten im CAD-Programm durch Schnitt zu bestimmen. Sämtliche Einzelsteine wurden anschließend

auf die eigentliche Wandstärke, die durch Handaufmass mit einer Stärke von bis zu 1,55 m ermittelt wurde, in einen 3D-Volumenkörper extrudiert.

Ein weiterer Schritt stellte die Konstruktion der abgerundeten Elemente im oberen Bereich des Turmes dar. Hierfür wurden alle vorbereiteten Punktwolken geladen und in einer Draufsicht angezeigt (siehe Abb. 6), so dass daraus eine Polylinie gezeichnet werden konnte, die zur weiteren Verarbeitung in AutoCAD übertragen wurde. Die Turmspitze wurde wegen der schlechten Laserreflexion am schwarzen Schiefer aus photogrammetrischen Messungen (Vorwärtsschnitt in mindestens drei Bildern) konstruiert. Wegen der schlecht zu identifizierenden Punkte am Schieferdach der Turmspitze konnten diese Objektpunktkoordinaten nur mit einer Standardabweichung von besser als 3 cm bestimmt werden. Das Ergebnis der Turmspitzenrekonstruktion ist in der Abb. 7 dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung der Rekonstruktion des Westerturmens ensembles ist in BIEBERMANN & SCHNEIDER (2005) zusammengefasst.

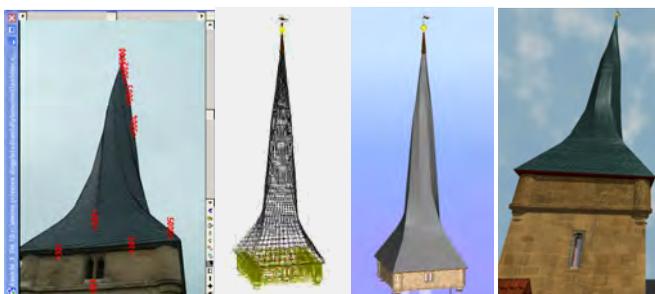


Abb. 7: Rekonstruktion der Turmspitze aus photogrammetrischen Bildpunktmessungen (links); Darstellung als Drahtmodell (2.v.l.), als schattiertes Modell in AutoCAD und als gerendertes Modell in Highlight Pro (rechts)

5.5. Visualisierung

Für die Visualisierung des Westerturms wurde die umgebende Topographie (Strassen, Wege, Pflasterübergänge, Schilder, Laternen, Abfalleimer und Wasserlauf) und die angrenzenden Gebäude (generalisiert) durch eine tachymetrische Aufnahme mit dem Leica TCRP 1105+ aufgenommen. Ergänzt wurden diese Aufnahmen durch ein detailliertes Handaufmaß von einigen Objekten wie Laternen und Schildern.

Die Visualisierung beider Objekte erfolgte mit verschiedenen Programmen: AutoCAD, AECViz von TORNADO Technologies Inc., Kanada, 3D Studio VIZ und Highlight Pro. In AutoCAD wurde das 3D-Volumenmodell mit entsprechenden Texturen für die jeweiligen Objektteile gerendert, um so eine Qualitätskontrolle der modellierten Daten zu erhalten und um daraus perspektivische Ansichten im BMP-Format zu erstellen. Eine interaktive Animation wurde jeweils mit AECViz erstellt, in dem das gesamte DWG-File (Kirche: 12 MB, Turm: 132 MB) in ein 3 bzw. 5 MB großes ausführbares Programm (EXE-File) umgewandelt wurde, das der Betrachter interaktiv aus allen Perspektiven anschauen und auch begehen kann. In Highlight Pro wurde jeweils eine Videosequenz mit einer Länge von 53 (Kirche) und 161 Sekunden (Turm) in einer Auflösung von 640 x 480 Pixel als kodiertes MPEG-File (30 bzw. 57 MB) erstellt (siehe Abb. 8), während mit 3D Studio ein virtueller Rundgang durch und im Westerturm als Film (3:31 min, AVI, 727 MB) erstellt wurde. Die Visualisierungen des Wes-

terturmensembles stehen dem Interessierten an einem Computer-Terminal in dem Turmcafe zur Verfügung.



Abb. 8 : Visualisierungen der Kirche Raduhn (links) und des Westerturmensembles (rechts) mit Highlight Pro

6 Zeit- und Kostenmanagement

Der Arbeitsaufwand für die gesamte Projektbearbeitung Westerturmensemble betrug 623 Arbeitsstunden, der je nach Tätigkeit mit entsprechenden aktuellen Stundenansätzen für Messgehilfe, Techniker und Ingenieur theoretische Gesamtkosten von ca. € 35000 für das Projekt verursachte. In Abb. 9 ist der prozentuale Arbeitsaufwand der einzelnen Arbeitsschritte dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass 52% der gesamten Arbeitszeit mit CAD-Bearbeitung und Visualisierung aufgewendet wurden. In der Zeit für Visualisierung sind nur die Arbeiten mit AutoCAD und AECViz enthalten, da die Videosequenzen später erstellt wurden.

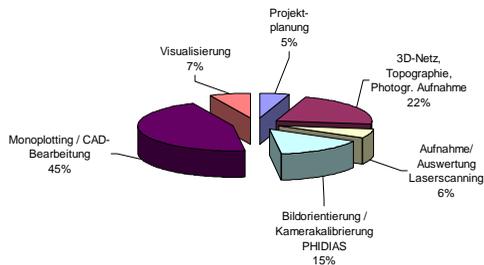


Abb. 9 : Prozentualer Arbeitsaufwand im Projekt Duderstädter Westerturmensemble

Im Projekt Kirche Raduhn wurden folgende Arbeitsstunden benötigt: Laserscanning 161 h (Objektaufnahme 6 h, 3Dipsos 91 h, AutoCAD 63 h) und Photogrammetrie 251 h (Objektaufnahme 2 h, PhotoModeler 144 h, AutoCAD 105 h). Daraus ergeben sich ohne die erforderliche 3D-Netzmessung und Passpunktbestimmung folgende Projektkosten: €7000 (Laserscanning) und €10000 (Photogrammetrie). Die höheren Kosten bei der Photogrammetrie sind durch den höheren Detaillierungsgrad zu begründen. Optimierungspotenzial für solche Projekte liegen bei der Objektaufnahme in der Anzahl der verwendeten Passpunkte, in der geodätischen Passpunktbestimmung, in der Reduktion des Laserscanningaufwandes auf wichtige Objektteile, bei der CAD-Bearbeitung durch zunehmende Erfahrung und durch Weglassen von Details.

7 Fazit und Ausblick

Die Kirche Raduhn und das Duderstädter Westerturmensemble wurden durch digitale Architekturphotogrammetrie und terrestrisches Laserscanning erfolgreich als virtuelles 3D-Volumenmodell rekonstruiert. Die eingesetzten Technologien (Instrumente und Software) ermöglichten eine detaillierte und exakte Rekonstruktion der Objekte mit einer Genauigkeit von 1-2 cm. Die kombinierte Auswertung der photogrammetrischen und der Laserscanning-Daten mit PHIDIAS erwies sich als sehr effizient, da eine direkte CAD-Anbindung für die weitere Modellierung vorhanden war. In dem Projekt Kirche Raduhn konnte durch die photogrammetrische Auswertung der Bilder ein detaillierteres Modell als aus den Punktwolken erstellt werden, doch der Arbeitsaufwand war dafür deutlich höher. Mit einer höheren Auflösung beim Laserscanning könnte auch aus den Punktwolken ein detailliertes Modell generiert werden, jedoch auf Kosten eines höheren Zeitaufwandes bei der Datenerfassung und bei der Auswertung. Für Anwendungen in der Architektur (z.B. Bauwerkserfassung) lohnt es sich, den Laserscanner bei einer steingerechten Auswertung oder bei der Erfassung von Objektdetails wie Skulpturen und Ornamente in Kombination mit der Photogrammetrie einzusetzen, wenn man die Objekte mit einer sehr hohen Punktdichte erfassen kann. Diese Objektdetails kann man dann über einfache Schnitte im CAD leicht modellieren. Dennoch bleiben auch in Zukunft eine manuelle Punktmessung und CAD-Bearbeitung ein erheblicher Kostenfaktor für solch detaillierte 3D-Modelle. Die kombinierte Erfassung und Auswertung setzt außerdem hohe Investitionskosten für das Laserscanning-System (ca. €120000) voraus. Dagegen ist ein Photogrammetrie-System (Kamera und PC/Software) mit ca. €7000 ein Low-Cost-System.

8 Literaturverzeichnis

- BECKER, R., SCHWERMANN, R. (2005). Bestandserfassung durch kombinierte Auswertung von Laserscanner- und Bilddaten. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 134-141.
- BIEBERMANN, M., SCHNEIDER, M. (2005). 3D-Erfassung und Modellierung des Duderstädter Westerturmensembles durch Kombination von digitaler Architekturphotogrammetrie und terrestrischem Laserscanning. Unveröffentlichte Diplomarbeit, HafenCity Universität Hamburg, Juni.
- HOFFMANN, R. (2005). Vergleichende Untersuchung bei der 3D-Erfassung und Modellierung der Kirche von Raduhn durch digitale Photogrammetrie und terrestrischem Laserscanning. Unveröffentlichte Diplomarbeit, HafenCity Universität Hamburg, Juni.
- HÖNNIGER, C., KERSTEN, TH. (2005). Topographische Aufnahme der sächsischen Ringwallanlage Willenscharen mit dem 3D-Laserscanning-System Mensi GS100. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 224-231.
- KERSTEN, TH., ACEVEDO PARDO, C. (2002). 3-D Objektaufnahme von historischen Gebäuden durch digitale Architekturphotogrammetrie für Visualisierungsaufgaben und für Facility Management. Photogrammetrie und Laserscanning, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 42-56.
- KERSTEN, TH., EILMUS, B., LINDSTAEDT, M., ACEVEDO PARDO, C. (2003). 3D-Erfassung und Visualisierung des Celler Schlosses durch digitale Architekturphotogrammetrie. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2003, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 213-222.
- MENSI (2004). GS 100 3D laser scanner. <http://www.mensi.com/website2002/gs100.asp>

Schnelle berührungslose Bestimmung der Oberflächenstruktur langrunder Körper

ROBERT W. KUHN, ROBERT NIESE, ROMAN CALOW, BERND MICHAELIS¹
& MARKUS SCHNITZLEIN²

Zusammenfassung: Systeme zur berührungslosen Generierung von texturierten Oberflächen auf der Basis der 3D-Vermessung und Texturerfassung natürlicher Objekte werden immer bedeutsamer. Einsatz finden sie z.B. in der Biometrie oder im medizinischen Bereich, wo es auf die Analyse und Bewertung der Oberflächenstruktur ankommt. Auf Grund der Erfahrungen mit bisherigen Lösungen wurde ein berührungsloses Messsystem entwickelt, welches nur sehr kurze Rechenzeiten benötigt und die Textur rundum erfassen kann.

1 Systemaufbau

Da eine objektseitige Auflösung von mindestens 1000dpi angestrebt ist, wird statt der sonst üblichen Matrixkameras ein RGB-Zeilensensor verwendet. Ein Strahlengang läuft direkt über ein Objektiv auf die Mitte des Sensors. Die Seitenansichten ergeben sich über zwei Spiegel und zwei Objektive, deren Strahlengänge auf denselben Zeilensensor an anderer Position geführt werden. Somit können auch die Seiten des Objektes aufgenommen werden (siehe Abb. 1). Das gesamte System ist starr miteinander verbunden und wird mittels einer Linear-einheit entlang des Objektes bewegt, welches dabei aufgenommen wird. Im entstandenen Bild liegen somit eine Zentralprojektion und eine Orthogonalprojektion vor.

Da die Kameras nur ein eingeschränktes gemeinsames Sichtfeld haben, wird zur 3D-Berechnung auf das bekannte Lichtschnittverfahren in weiterentwickelter Form zurückgegriffen. Dabei werden Lichtebenen von zwei LED-Projektoren auf den langrunden Körper projiziert. Mittels Berechnung des Schnittes zwischen Ebenen und Sehstrahlen der Kamera erhält man die gewünschte 3D-Information. Die Wellenlänge des Lichtes der Ebenen liegt dabei in einem Bereich, für den eine Komponente des Farbsensors nicht empfindlich ist. Aus diesem Kanal wird - um keine Überlagerung der Lichtebenen mit der Textur zu erhalten – die Oberflächenstruktur extrahiert.

1.1 Modellierung des Strahlenganges

1.1.1 Pix2World - Berechnung des Strahles für einen Bildpunkt

Die drei Linsen des Scanners bilden drei Projektionszentren, die über eine Lineareinheit verschoben werden. Das Objekt bleibt dabei unbewegt. Die Spiegel in Verbindung mit den Linsen ergeben jeweils optische Systeme, die hier bei der Modellierung als eigenständige Kameras aufgefasst werden. Durch eine Änderung des Vorzeichens der Kamerakonstante c wird berücksichtigt, dass der Strahlengang durch die Spiegel seitenverkehrt wird. Die Modellierung jeder der drei Kameras entspricht der klassischen Modellierung einer im Raum auf einer

¹ Robert W. Kuhn, Universität Magdeburg, Postfach 4120, 39016 Magdeburg,
e-mail: robert.kuhn@e-technik.uni-magdeburg.de

² Markus Schnitzlein, Chromasens GmbH, Max-Stromeyer-Str. 116, 78467 Konstanz,
e-mail: markus.schnitzlein@chromasens.de

Achse translatorisch bewegten Matrixkamera, von der jedoch nur eine Zeile betrachtet wird. Das Weltkoordinatensystem wird bei der Kamerakalibrierung durch den Kalibrierkörper so festgelegt, dass sich die Z-Achse in etwa parallel zur Bewegungsrichtung der Lineareinheit befindet. Das spielt dann eine Rolle, wenn die Drehwinkel der Rotationsmatrizen interpretiert und ihre Reihenfolge festgelegt werden soll.

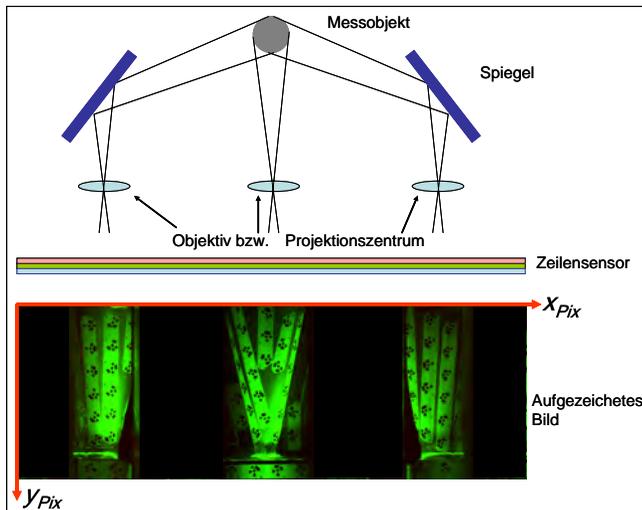


Abb. 1: Schematische Darstellung mit Strahlengang des Sensorsystems und dem entstandenen Abbild, hier ein Kalibrierkörper. Oben: Schnitt durch das Messsystem; Unten das aufgezeichnete Bild, zusätzlich entstehende „Geisterbilder“ sind maskiert.

Die Bewegung der drei Kameras durch die Lineareinheit wird durch die Multiplikation $s \cdot y_{Pix}$ eines gemeinsamen Richtungsvektors s mit der Koordinate einer gegebenen Bildzeile y_{Pix} beschrieben. Die betragsmäßig größte Vektorkomponente in s ist die Z-Komponente. Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass die drei Kameras fest mit der Lineareinheit verbunden sind und deren relative Lage zueinander stabil bleibt. Die statische Lage jeder der drei Kameras innerhalb der beweglichen Lineareinheit wird durch je einen 3D-Ortsvektor modelliert und ihre Orientierung im Weltkoordinatensystem durch je drei aufeinander folgende Rotationen angegeben. Die Abbildung durch das Linsensystem wird zunächst vereinfacht als Zentralprojektion aufgefasst und mittels Lochkameramodell repräsentiert. Für die Projektion eines Punktes aus dem Kamerakoordinatensystem ins Bild wird die folgende Gleichung verwendet:

$$x_{iPix} = H_i - C_i \cdot \frac{k_{iX}}{k_{iY}} \quad (1)$$

x_{iPix} (Pix) ist die horizontale Koordinatenrichtung mit Koordinatenursprung linke Bildspalte, C_i (Pix) die Kamerakonstante, H_i (Pix) der Hauptpunkt, $k_{iX/Y}$ die Punktkoordinate im Kamerakoordinatensystem der Zeilenkamera i . Es wichtig zu erwähnen, dass es sich um nur einen

Richtungsvektors, aber um drei Parametersätze der drei Kameras handelt (Index $i = 1...3$). Damit ergibt sich für die Umrechnung eines im Kamerakoordinatensystem gegebenen Punktes ins Weltkoordinatensystem \mathbf{w} folgende Gleichung:

$$\mathbf{w} = \mathbf{s} \cdot y_{iPix} + \mathbf{t}_i + \mathbf{R}_{iZ} \cdot \mathbf{R}_{iY} \cdot \mathbf{R}_{iX} \cdot \mathbf{k}_i \quad (2)$$

i ist der Index der Kamera, \mathbf{k}_i (mm) ist der Punkt im Kamerakoordinatensystem, \mathbf{w} (mm) ist der Punkt \mathbf{k}_i im Weltkoordinatensystem, \mathbf{s} (mm/Pix) ist der Richtungsvektor der Bewegung, wenn der Linearmotor um eine Zeile weiterbewegt wurde und y_{iPix} (Pix) ist der Zeilenindex im Kamerabild korrespondierend mit einer bestimmten Position der Lineareinheit im Weltkoordinatensystem. $\mathbf{s} \cdot y_{iPix}$ (mm) ist die Lage des Koordinatenursprungs der Lineareinheit im Weltkoordinatensystem, \mathbf{t}_i (mm) ist die Lage des Projektionszentrums der Kamera innerhalb der Lineareinheit (relativ zum Koordinatenursprung der Lineareinheit $\cdot y_{iPix}$). $\mathbf{R}_{iZ} \cdot \mathbf{R}_{iY} \cdot \mathbf{R}_{iX}$ sind die aus drei Einzelmatrizen zusammengesetzten Rotationsmatrizen. Ihre Darstellung kann durch Weglassen der vierten Zeile/Spalte aus WACHTER übernommen werden.

1.1.2 World2Pix – Berechnung des Bildpunktes eines 3D-Punktes

Die Vektorgleichung (2) ausgeschrieben ergibt drei Gleichungen und drei Unbekannte (y_{iPix}, k_X, k_Y). Diese erhält man durch Lösung des Gleichungssystems:

$$\begin{bmatrix} y_{iPix} \\ k_X \\ k_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_X & r_{11} & r_{12} \\ s_Y & r_{21} & r_{22} \\ s_Z & r_{31} & r_{32} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} w_X - t_X - r_{13} \cdot k_{iZ} \\ w_Y - t_Y - r_{23} \cdot k_{iZ} \\ w_Z - t_Z - r_{33} \cdot k_{iZ} \end{bmatrix} \quad (3)$$

(r_{ij} sind die Elemente der Rotationsmatrix.) Die inverse Matrix in diesem Ausdruck ist konstant ist, da sie ausschließlich Parameter der Kalibrierung enthält. Das heißt, sie kann zur Steigerung der Performanz vorher berechnet und abgespeichert werden. Der Pixelindex x_{iPix} auf der Sensorzeile ergibt sich durch Anwendung von Gl. (1).

1.2 Kalibrierung

1.2.1 Kamerakalibrierung

Die Kamerakalibrierung folgt dem in der Literatur (LUHMANN) üblichen Schema des Bündelblockausgleiches. Die Standardabweichungen der Unbekannten bei einer typischen Kalibrierung werden in folgender Tabelle wiedergegeben:

Tabelle 1: Die Standardabweichungen der Unbekannten

	Linke	Mittlere	Rechte Kamera
Kammerkonstante [Pix]	51.15	16.65	49.30
Hauptpunkt [Pix]	45.49	16.27	50.05
Positionsvektor [mm]	<0.95	<0.36	<0.90
Drehwinkel um Z [deg]	<0.5	<0.18	<0.43
Richtungsvektor [mm]	<0.000015	<0.000012	<0.000011

Bei den Winkeln war stets die Standardabweichung des Drehwinkels um die Z-Achse am größten, da für diese Achse die Passpunktconfiguration ungünstig war.

1.2.2 Ebenenkalibrierung

Bei dem Sensor werden durch die Projektoren eine Anzahl Lichtebenen auf das Messobjekt projiziert. Damit müssen zwei Voraussetzungen für die 3D-Berechnung erfüllt sein:

- Alle Ebenen müssen kalibriert werden.
- Der Schnitt der Ebenen mit der Objekt Oberfläche bildet sich als Kontur ab. Die jeweilige Kontur muss der richtigen Ebene zugeordnet werden.

Die Zuordnung wird über künstliche Merkmale der Ebenen, wie unterschiedliche Dicke und Abstände zueinander ermöglicht. Die Parameter der Ebenen müssen durch eine Kalibrierung bestimmt werden. Die Parameter werden wiederum durch Ausgleichsrechnung geschätzt. Dazu müssen durch Einlegen eines geeigneten Kalibrierkörpers genügend 3D-Punkte, welche auf der Ebene liegen, bestimmt worden sein. Hat man eine ausreichende Anzahl von Punkten, kann man die Ebenengleichung durch Fitting ermitteln.

2 Rekonstruktion und Abwicklung

Das beschriebene Messsystem eignet sich zur Erfassung, Rekonstruktion und Abwicklung künstlicher und biologischer Körper. Beispielhaft wird dies im Folgenden an einem menschlichen Finger demonstriert, was eine interessante Applikation im medizinisch/dermatologischen oder Sicherheitsbereich darstellt. Die hierzu erstellte Fingergeometrie basiert auf den erfassten 3D-Messpunkten, welche fortan als Fitting-Punkte P bezeichnet werden und aus der 2D-Segmentierung der projizierten Lichtebenen mit anschließender Transformation in Weltkoordinaten generiert werden. Eine gutartige Form des Messobjektes muss dabei vorausgesetzt werden.

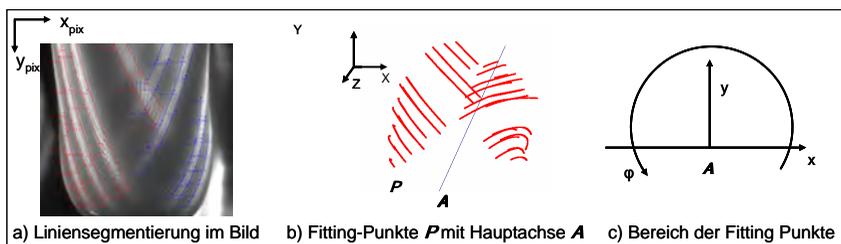


Abb. 3: Definition des Bild- und Weltkoordinatensystems, a) Liniensegmentierung im Bild, b) 3D-Fitting Punktmenge P , c) Hauptachse A mit Messpunkten

2.1 Bestimmung der Hauptachse und Modellausrichtung

Die 3D-Messpunkte können einen weiten räumlichen Bereich um das Objekt herum von mehr als 200 Grad beschreiben. Um den Vorgang der Rekonstruktion zu vereinfachen, ist es hilfreich, eine Hauptachse A zu definieren, die sich nahe des Zentrum des erfassten Objektes befindet und parallel zur Z-Achse verläuft (Abb. 3b-c).

Durch den Aufbau des Messsystems liegt das erfasste Objekt bereits dicht zur der Z-Achse. Die verbleibende Restabweichung wird durch einen ICP Algorithmus ausgeglichen (Iterative Closest Point, siehe BESL & MCKAY). Hierdurch wird eine initiale Hauptachse A^* auf der Grundlage der initialen Messpunktmenge P^* ermittelt (Abb. 3b). Dazu wird ein durch äquidistante Punkte approximiertes Modell M eines Halbzylinders erzeugt. Der Radius r des Halbzylinders wird automatisch durch Segmentierung aus der Breite d des aufgenommenen Körpers im zentralen Kamerabild abgeleitet (Abb. 4a)). Die Zylinderachse entspricht der gesuchten Hauptachse A^* .

Das ICP-Verfahren verwendet sechs Freiheitsgrade (Rotation + Translation) und bestimmt den Transformationsvektor T zwischen Modell M und Punktmenge P^* .

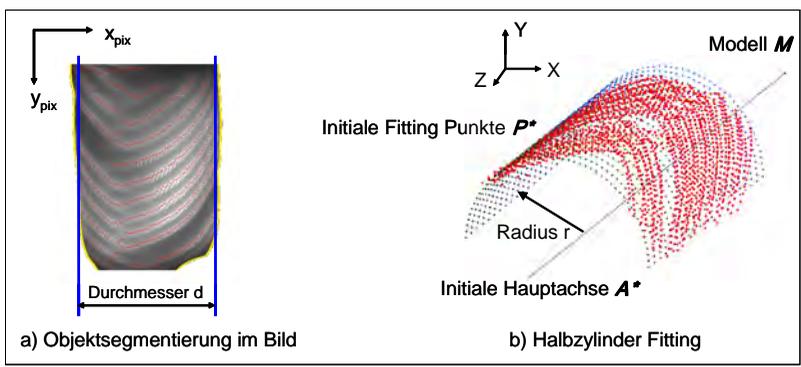


Abb. 4: a) Aus dem Bild abgeleiteter Objektdurchmesser d b) Halbzylinder M mit Radius r , initiale Punktmenge P^* und initialer Hauptachse (Zylinderachse) A^*

Zur Vereinfachung und Beschleunigung des Rekonstruktionsprozesses wird vorausgesetzt, dass die Hauptachse A parallel zur Z-Achse liegt. Dazu wird die inverse Modellrotation auf die initiale Punktmenge P^* und Achse A^* angewandt, was in P bzw. A resultiert. Nach diesem Transformationsschritt sind die Fitting-Punkte und die Hauptachse mit den Koordinatenachsen in Übereinstimmung gebracht.

2.2 Approximation der Oberfläche durch b-Splines und Dreiecksnetze

Freiformflächen können beliebig geformte Oberflächen beschreiben. Nach Abwägung von Effizienz und Qualität haben wir uns in dem beschriebenen Verfahren für ein Fitting durch b-Spline Flächen quadratischer Ordnung entschieden (siehe PIEGL & TILLER sowie Gl. (4)).

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) \cdot N_{j,q}(v) \cdot C_{i,j} \quad , \quad u, v \in (0,1) \quad (4)$$

Um eine korrekte topologische Parametrisierung der b-Spline Kontrollpunkte C zu erhalten, verwenden wir für den UV -Parameterraum kartesische Koordinaten entlang der U -Achse und zylindrische Koordinaten entlang der V -Achse. Hierbei wird bezüglich der Fittingpunkte P_i die Z -Koordinate auf die U -Achse abgebildet und der Winkel φ_i zwischen P_i und der Hauptachse A auf die V -Achse (siehe Gl. (5) und Abb. 5).

$$l \cdot \cos \varphi_i = \Delta y \tag{5}$$

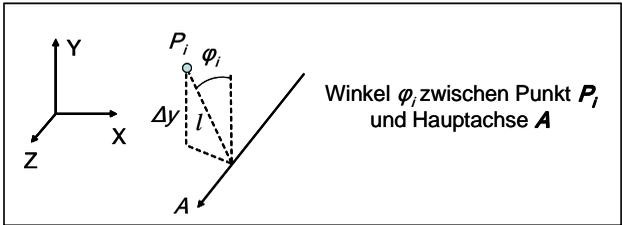


Abb. 5: UV-Parameterraum

Die Berechnung der Kontrollpunkte C basiert auf der Standardtechnik der kleinsten Fehlerquadrate. Dabei wird der Abstand zwischen der Zielfläche und den Fitting-Punkten P minimiert. Um ungleiche Punktverteilungen auszugleichen, welche zu starken Biegungen der Splinefläche führen können, fügen wir einen Regularisierungsterm ein. Dieser limitiert die Krümmung der Fläche in Bereichen geringer Messpunktdichte.

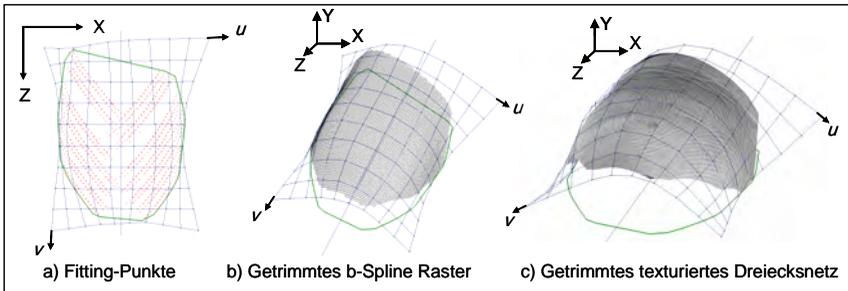


Abb. 6: b-Spline Kontrollgitter und konvexe Hülle, Verarbeitungsschritte

Die b-Spline-Fläche wird im Bereich ihres Kontrollpunktgitters im Parameterbereich von $UV [0,1]$ berechnet (Abb. 6). Durch die Berechnung einer konvexen Hülle wird die Fläche außerhalb des Messpunktbereiches entfernt. Hierfür werden die Punkte P in die XZ-Ebene projiziert, wo die 2D konvexe Hülle bestimmt wird (siehe O'ROURKE). Für die texturierte Visualisierung der Rekonstruktion wird ein Dreiecksnetz generiert. Weiterhin wird die Netzstruktur zur Projektion der Geometrie in die Ebene, d.h. zur Abwicklung verwendet. Die Netzpunkte werden durch gleichmäßige Abtastung des UV Parameterraumes der b-Splinefläche und den zuvor bestimmten Kontrollpunkten gewonnen. Das Dreiecksnetz besteht aus einem Raster von $m \cdot n$ Punkten inklusive Nachbarschaften (Abb. 6). Eine Mindestauflösung von 400×400 Punkten hat sich als sinnvoll herausgestellt. Die Nachbarschaftsinformation wird zur Schnittberechnung bei der Abwicklung benötigt.

2.3 Texturzuweisung

Die Zuweisung von Texturwerten zu Dreiecksnetz- oder beliebigen 3D-Punkten ist eine Schlüsselfunktion. Wie in Abschnitt 1.1b definiert, wird ein Punkt \mathbf{p}_i auf die Bildkoordinaten einer vorgegebenen Kamera projiziert. Der Aufbau des Messsystems stellt sicher, dass die Kameras einen festen Überlappungsbereich aufweisen.

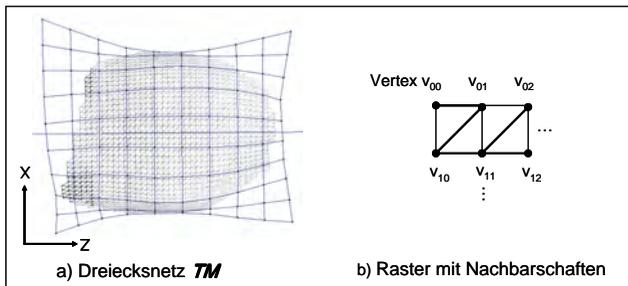


Abb. 7: Dreiecksnetz-Raster

Die Kamerakalibrierung gleicht die verschiedenen Auflösungen aus, so dass ein Punkt \mathbf{p}_i , der im Überlappungsbereich liegt, prinzipiell aus zwei Kameras Texturwerte beziehen kann. Aufgrund der verschiedenen Blickwinkel können jedoch unterschiedliche Schärfen und Helligkeiten auftreten, was nachfolgende Korrekturmaßnahmen erfordert. Für die Wahl der Kamera zur Berechnung eines beliebigen Punktes verwenden wir die Hauptachse A . Analog zu Gl. (5) wird für jeden Punkt \mathbf{p}_i der Winkel φ_i bestimmt, auf dessen Grundlage die Kamera gewählt wird (Abb. 8).

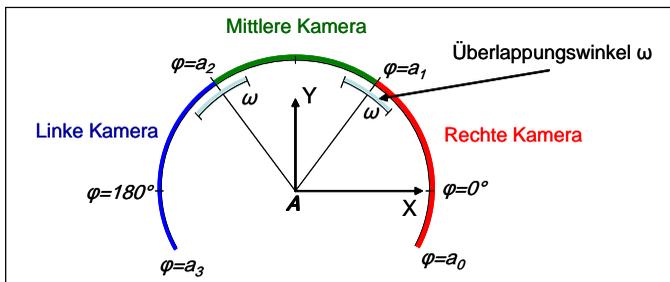


Abb. 8: Winkelbasierte Kamerawahl mittels Hauptachse A

Die Winkel zur Kameraumschaltung folgen aus den physischen Abmaßen des Messsystems. Zur Verbesserung des Ergebnisses entlang der Übergangszone zweier Kameras innerhalb eines Überlappungswinkels ω verwenden wir eine Überblendung mittels linearer Interpolation. Weiterhin wird eine Helligkeitsanpassung durchgeführt.

2.4 Abwicklung

Zur Analyse der Oberflächentextur ist eine Projektion in die Ebene nützlich, welche eine konstante Bogenlänge um das Objekt herum erhält. Hierzu haben wir ein schnelles Schnitt-

verfahren entwickelt, welches das Dreiecksnetz entlang der Hauptachse mit XY-parallelen Ebenen schneidet. Abhängig von der gewünschten resultierenden Bildauflösung werden n Schnittebenen I_{XY} und damit Schnittkonturen IC_i erzeugt.

Die Hauptachse A wird vertikal auf die Schnittkonturen IC_i projiziert, woraus eine Menge von Punkten P_j resultiert. Ausgehend von P_j werden die Schnittkonturen äquidistant in beide Richtungen abgetastet, was zu zwei Punktmengen P_{E1} und P_{E2} führt (Abb. 9a). Jede Schnittkontur entspricht einer Zeile im Bild der Abwicklung. Die Texturwerte für die Punktmengen P_{E1} und P_{E2} werden bestimmt (Abschnitt 2.3) und ausgehend von der vertikalen Bildmittellinie X_m in das Bild der Abwicklung eingezeichnet (Abb. 9b).

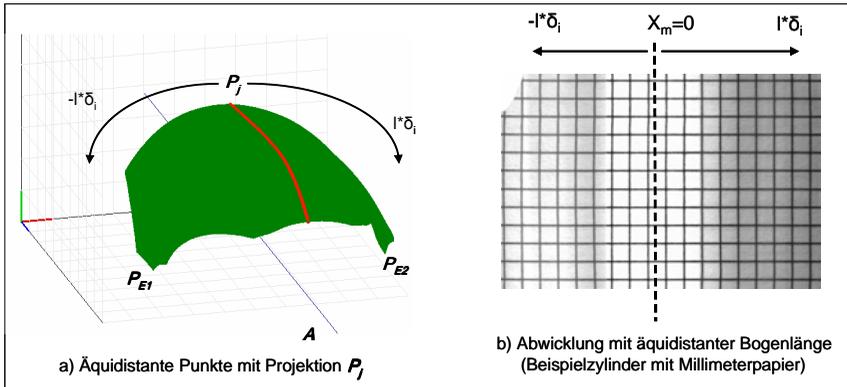


Abb. 9: Prinzip der Abwicklung

3 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein schnelles System auf Basis vieler Lichtschnitte vorgestellt, welches bei gutartigen Formen des Messobjektes sicher in der Lage ist, die 3D-Form und die texturierte Oberflächenbeschreibungen zu generieren. Die nächsten Aufgaben sind einerseits eine weitere Beschleunigung sowie eine Minituarisierung des gesamten Meßsystems.

4 Literaturverzeichnis

- WACHTER, S.: Verfolgung von Personen in monokularen Bildfolgen, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Informatik, 1997.
- BESL, P.J. & MCKAY, N.D.: A method for registration of 3D shapes. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence., pp. 239–256, 1992.
- LUHMANN, T.: Nahbereichsphotogrammetrie, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2000.
- O'ROURKE, J.: Computational geometry in C; Cambridge University Press, 1995.
- PIEGL, L. & TILLER, W.: The *NURBS* Book; Springer, 1997.

Das Four Thirds-System – Bessere Bildqualität für die Photogrammetrie?

JÜRGEN PEIPE¹

Zusammenfassung: Qualitätsprobleme bei der Bildaufnahme mit digitalen Spiegelreflexkameras und konventionellen, auf 35 mm Film bezogenen Objektiven führten im Jahr 2002 zur Definition eines neuen, optimierten Konstruktionsprinzips für digitale SLR-Systeme durch die Firmen Olympus und Kodak. Im vorliegenden Bericht wird die Entwicklung dieses Four Thirds-Standards beschrieben, verfügbare Kameras und Objektive werden genannt, und es werden erste Ergebnisse photogrammetrischer Testmessungen vorgestellt

1 Einleitung

Die Qualität der digitalen Bildaufnahme wird durch eine Reihe von Faktoren beeinflusst, z.B. durch die Größe und Zahl der Sensorelemente, die Leistungsfähigkeit der kameraspezifischen Software und nicht zuletzt durch die Güte des Objektivs. Während bei Kompaktkameras mehr oder weniger qualitätvolle Objektive fest mit dem Kamerakörper verbunden sind, können bei Spiegelreflexkameras (SLR) in der Regel die Objektive gewechselt werden, ja dies ist geradezu ein Charakteristikum des Kameratyps. Nach der Einführung digitaler SLR-Systeme boten die Hersteller zunächst weiterhin ihre vorhandenen "analogen" Wechselobjektive zu den neuen, digital registrierenden Kamerakörpern an. Den Kunden wurde nahe gelegt, den Kamerakörper auszutauschen, Objektive und andere Accessoires aber zu behalten - ein gutes Verkaufsargument für den Umstieg in die digitale Technik.

Nach einiger Zeit wurde klar, dass selbst hochwertige analoge Objektive an einer digitalen SLR-Kamera Abbildungsfehler erzeugen, vor allem im Randbereich der Bilder (Unschärfen, Farbverfälschungen, Abschattungen, Auftreten von Artefakten). Diese Probleme zeigen sich am deutlichsten bei den Kameras mit 24 x 36 mm² Vollformatsensor, besonders stark bei Weitwinkelobjektiven. Hier treffen die Lichtstrahlen relativ schräg auf den Sensor, müssen vorher durch IR- und RGB-Filter (Bayer-Mosaik) und eventuell durch Mikrolinsen vor der Chipfläche. Dies beeinträchtigt die Abbildungsqualität erheblich. Generell gilt, dass die Lichtstrahlen nicht nur in der Sensormitte, sondern auch am Rand möglichst senkrecht aufkommen sollten. Als Konsequenz dieser Situation beschränken sich neu entwickelte digitale SLR-Kameras auf ein kleineres Sensorformat, das so genannte APS-C-Format mit ca. 16 x 24 mm². Abhilfe verspricht auch die Konstruktion neuer "digitaler", also speziell für die Digitalfotografie konstruierter Objektive. Inzwischen sind eine Reihe von Herstellern zu nennen, die einige solche Objektive anbieten: Canon, Minolta, Nikon, Pentax, Sigma und Tamron.

Ein völlig anderer Weg, eine hochwertige Abbildungsqualität zu erhalten, wird mit der Einführung des Four Thirds-Systems beschritten. Ausgehend von den Firmen Olympus und Kodak wurde ein - auch für andere Hersteller offener - Standard zur Entwicklung optimaler digitaler Spiegelreflexkameras geschaffen und damit die digitale SLR-Fotografie mit ihren speziellen Anforderungen neu definiert. Im Folgenden werden Grundlagen und Entwicklung

¹ Jürgen Peipe, Universität der Bundeswehr München, Institut für Photogrammetrie und Kartographie, e-mail: j-k.peipe@unibw-muenchen.de

des Four Thirds-Standards beschrieben, vorhandene Aufnahmesysteme (Kameras, Objektive) werden genannt, und es wird über photogrammetrische Testmessungen berichtet.

2 Der Four Thirds-Standard

Zur Photokina Messe 2002 kündigten die Firmen Olympus und Kodak ihre Zusammenarbeit zur Festlegung eines neuen, offenen Standards für die digitale Spiegelreflex-Fotografie an. Ziel war es, die technischen Beschränkungen der bisherigen, auf 35 mm Film bezogenen Kameratechnologie abzulegen und neue Aufnahmesysteme zu entwerfen, bei denen eine optimale Balance zwischen Bildqualität, Kameragröße, Kameragewicht und Objektivgüte erzielt wird. Zudem sollen die Produkte verschiedener Hersteller untereinander kompatibel sein. Dieser Initiative schloss sich unmittelbar die Firma Fujifilm an, im Laufe der Jahre folgten Panasonic, Sanyo, Sigma und zuletzt Leica. Inzwischen (Stand Juni 2006) sind fünf Kameras und 24 Objektive im Four Thirds-Standard auf dem Markt (Kap. 3).

Der Four Thirds-Standard legt einige Designmerkmale digitaler SLR-Kameras fest:

- Zur Bilderzeugung wird ein Sensor (CCD, CMOS o.a.) mit einem Seitenverhältnis von 4:3 eingesetzt. Diese Bezeichnung erlaubt keinen direkten Rückschluss auf die Sensorgröße, die im Four Thirds-Standard nicht exakt festgelegt ist. Sie wurde bei der ersten, nach dem neuen Standard entwickelten Kamera mit $13.5 \times 18 \text{ mm}^2$ angegeben (Länge der Bilddiagonale: 22.5 mm; 4/3 Zoll als Diagonalmass wären übrigens 33.9 mm). Bei den neueren Kameras beträgt das Sensorformat $13.1 \times 17.4 \text{ mm}^2$ (Diagonale: 22.3 mm). Die 4/3 Sensorgröße ermöglicht die Konstruktion kompakterer (kleinerer) und leichter Kameras und Objektive als sonst im SLR-Bereich üblich.
- Um eine intensive und gleichmäßige Ausleuchtung des Sensors zu erhalten, ist der Bildkreis, den das Objektiv mit seinem Bajonett-Durchmesser auf den Sensor projiziert, wesentlich größer (ca. 2-fach) als der Sensor selbst. So wird eine nahezu telezentrische Bauweise der Objektive möglich, bei der die Lichtstrahlen weitgehend parallel auf den Sensor treffen.
- Art, Größe und Form des Objektivanschlusses und der Kamerafassung (Bajonett) sind standardisiert und werden offen gelegt, um Kompatibilität der Objektive verschiedener Hersteller zu gewährleisten. Zudem sind der Abstand zwischen Bildebene und Objektivanschluss (Auflagemass) sowie die Position des Bildsensors in Bezug zur letzten Objektivlinse festgelegt.
- Die nach dem neuen Standard konstruierten Objektive enthalten - wie erwähnt - nahezu telezentrische Optiken, so dass Qualitätsverluste auch in den Bildecken (Vignettierung etc.) weitgehend vermieden werden, selbst bei weitwinkligen Objektiven. Die Auflösung der Objektive ist so hoch, dass die Abbildungsleistung von Sensoren bis zu 20 Megapixeln ausgeschöpft werden kann.

3 Aufnahmesysteme nach dem Four Thirds-Standard

Die fünf nach dem 4/3 Standard konzipierten und am Markt vorhandenen Kamerakörper sind

- Olympus E-1 (Markteinführung Sept. 2003; 5 Megapixel)
- Olympus E-330 (März 2006; 7.5 MP; Weiterentwicklung des noch erhältlichen Vorläufers E-300 mit 8 MP)
- Olympus E-500 (Nov. 2005; 8 MP)
- Panasonic Lumix DMC-L1 (vorangekündigt; erscheint im Herbst dieses Jahres; 7.5 MP)

Alle Kameras - vielleicht mit Ausnahme der Panasonic, von der noch kein Preis bekannt ist - sind dem unteren Preissegment (Basisklasse) der SLR-Kameras zuzuordnen (Abb. 1-4).



Abb. 1: Olympus E-1



Abb. 2: Olympus E-300



Abb. 3: Olympus E-500



Abb. 4: Panasonic Lumix DMC-L1

Zusätzlich zu den vom 4/3 Standard vorgegebenen Eigenschaften weisen die Kameras noch einige Besonderheiten auf:

- Staubschutz-System: Vor dem Sensor ist ein Staubfilter angebracht, der durch einen Ultraschall-Generator in Schwingungen versetzt werden kann. Staubpartikel werden auf diese Weise vom Filter gelöst und bleiben auf einer speziellen Folie im Kamerakörper haften. Die Staubschutzfunktion kann manuell ausgelöst werden, findet aber wohl auch beim Einschalten der Kamera statt. Inwieweit dadurch die innere Orientierung der Kamera beeinträchtigt wird, ist unbekannt.
- Ein neuartiges platzsparendes Spiegelsucher-System anstelle des bei SLRs üblichen Pentaprismas (bei E-300, E-330 und Lumix).
- Permanente Live-Vorschau auf dem rückseitigen Display der Kamera, also ohne durch das Okular sehen zu müssen (bei E-330 und Lumix).
- Besondere Aufmerksamkeit gebührt der Panasonic Lumix DMC-L1. Hier treffen die Erfahrungen mehrerer Firmen zusammen: Olympus mit dem 4/3 Standard, Panasonic mit der

gemeinsamen Entwicklung von Live-Sensor und dem im Zoom-Wechselobjektiv von Leica integrierten Bildstabilisator.

Für die 4/3 Kameras steht eine Vielzahl von Objektiven, vor allem von den Firmen Olympus und Sigma zur Verfügung, fast ausschließlich Zoom-Objektive, keine Festbrennweiten. Die Brennweiten reichen von 7 mm bis 300 mm, entsprechend 14 mm bis 600 mm, auf das Kleinbildformat bezogen.

4 Photogrammetrische Testmessungen

Um die Eignung von Kameras für photogrammetrische Anwendungen zu untersuchen, hat sich in den letzten Jahren ein Vorgehen nach der VDI/VDE-Richtlinie 2634/Blatt1 "Optische 3D-Messsysteme - Bildgebende Systeme mit punktförmiger Antastung" bewährt. Im Rahmen einer Bündelausgleichung mit simultaner Kalibrierung der Aufnahmekamera werden innere und äußere Orientierungen sowie 3D-Koordinaten von signalisierten Objektpunkten in einer empfohlenen Anordnung bestimmt. Als Kriterium für die Qualität des Messsystems werden die Längenmessabweichungen an kalibrierten Testlängen benutzt (Näheres in VDI/VDE, 2002).

Erste Testmessungen mit einer Olympus E-300 und einem Zoom-Objektiv Zuiko 14-54 mm, fixiert in der Weitwinkelstellung ($f = 14$ mm; dies entspricht ca. 28 mm, bezogen auf das Kleinbildformat 24×36 mm²) führten zu kaum zufrieden stellenden Ergebnissen. Zwar ist die optische Qualität der Bilder hoch, die aus der Bündelausgleichung abgeleiteten Längenmessabweichungen erreichen jedoch Maximalwerte (Spanne) von bis zu 250 μ m (s_0 a posteriori = 0.6 μ m), dies sogar bei bildweiser Kalibrierung der Kamera. Sensorbewegungen als eine Ursache für die hohen Abweichungen sind zu vermuten. Ein Zusammenhang mit dem Staubschutz-System im Bereich des Sensors ist vorstellbar.

5 Abschließende Bemerkungen

Generell ist festzustellen, dass das Konzept des Four Thirds-Standards und seine Umsetzung in Kameras und Objektiv überzeugt. Aus ersten Testmessungen konnte jedoch kein Hinweis auf eine erfolgreiche Anwendung in der Photogrammetrie abgeleitet werden. Weitere Untersuchungen sind geplant.

6 Literaturverzeichnis

VDI/VDE (2002): VDI/VDE-Richtlinie 2634. Beuth Verlag, Berlin.

Ermittlung der Kameradaten aus www.olympus.de und www.olympus.com

Geomorphologie und Neotektonik anhand von Drainagesystem und longitudinalen Flussprofilen im Erzgebirge

Alexandra Käßner¹, Richard Gloaguen¹, Klaus-Peter Stanek¹

Zusammenfassung: Flüsse sind ein wichtiges Werkzeug der Geomorphologie, da sie der Teil einer Landschaft sind, der am empfindlichsten auf Änderungen der Umweltbedingungen reagiert, weshalb neotektonische Bewegungen hier am besten erkannt werden können.

Digitale Geländemodelle ermöglichen ein extrahieren des Flusssystems und damit eine effektive und umfassende Untersuchung der Geomorphologie eines Gebietes. Mit Hilfe des Gradientindex und der Beziehung von Einzugsgebiet und Gefälle wurden Flusslängsprofile im Erzgebirge untersucht. Es zeigte sich, dass sich nahezu kein Fluss in diesem Gebiet im Gleichgewicht befindet, was ein Hinweis auf rezente aktive Bewegung an Störungen ist, die den Flusslauf schneiden. Zusätzlich wurde der Einfluss von tektonischen Elementen auf die Fließrichtung eines Gewässers am Beispiel der Zschopau untersucht. Auch hier zeigen sich starke Abhängigkeiten.

1 Einleitung

Die Oberflächenform des Erzgebirges ist stark durch die tief eingeschnittenen Flusstäler geprägt. Diese Flüsse, die also den Großteil der Morphologie erzeugten, liefern ein Abbild der äußeren Bedingungen. Sie reagieren relativ schnell auf Klimaänderungen, tektonische Hebungs- und Senkungsprozesse, Sedimentfracht, Vegetation und auch anthropogene Einwirkungen. Ihr heutiger Zustand ist daher ein Ausdruck dieser Umwelteinflüsse und die Beobachtung des Flusslaufes sowie der Längsprofile sollte Auskunft über einzelne Umweltbedingungen geben.

Die Flüsse des Erzgebirges weisen eine Reihe von Besonderheiten auf, die teilweise bereits in früheren Arbeiten erwähnt wurden (KÄUBLER, 1959; RICHTER, 1955). Auffällige plötzliche Richtungsänderungen sowie parallele Flussläufe zeigen die Richtung vorhandener Störungen an, welche vom fließenden Wasser als Schwächezonen im Gestein bevorzugt genutzt werden. STOYAN & STOYAN (1983) wiesen auf eine lokale Korrelation des Gewässernetzes und des Kluftsystems im Raum Freiberg hin.

Flusslängsprofile können Auskunft über tektonische Prozesse geben, da sie Höhenänderungen widerspiegeln. Um neotektonische Bewegungen erkennen und eventuell quantifizieren zu können, muss man andere äußere Einflüsse aus den Betrachtungen ausklammern. Das untersuchte Gebiet umfasst das gesamte Erzgebirge sowie den Egergraben und südlich angrenzende Gebiete. Im Osten reicht es bis nach Dresden und im Westen bis ins Vogtland. Der Egergraben selbst ist der zentrale Bereich des verwendeten Digitalen Geländemodells, welches zu der Erstreckung im Sächsischen Raum im Norden bis etwa Freiberg auch im Süden ähnlich viel tschechisches Gebiet umfasst (Abb.1)

2 Datengrundlage

Die SRTM-3 Daten, die hier verwendet wurden weisen eine Auflösung von 90m auf und wurden aus SRTM-1 Daten durch direkte Mittelwertbildung erzeugt. Dies wirkt gleichzeitig

¹ Institut für Geologie, TU Bergakademie Freiberg

als Filter und glättet die Daten. Die SRTM-1-Daten werden aus "Sicherheitsgründen" nicht angeboten, sondern nur militärisch genutzt (CZEGA et al.).

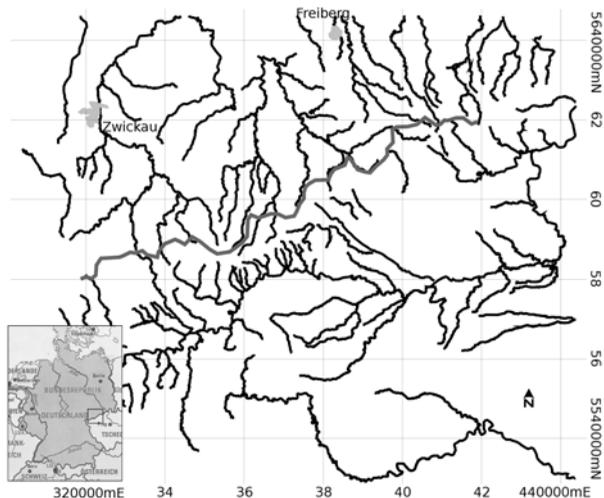


Abb. 1: Karte der untersuchten Flüsse; etwas nördlich der Bildmitte erkennt man die Grenze zwischen BRD und CZ, links unten im Bild befindet sich eine Karte der BRD, das eingezeichnete Viereck entspricht dem Kartenausschnitt.

Die Höhenwerte liegen in Meter, bezogen auf das WGS84 Ellipsoid vor.

Anhand der Höhendaten ist es möglich das Drainagesystem zu extrahieren (Algorithmus von JENSON & DOMINQUE, 1988). Zu diesem Zweck wird zuerst die Fließrichtung des Wassers in jedem Pixel (x) im DGM berechnet. Die Fließrichtung bezieht sich auf die 8 Pixel, die x umgeben. Sie wird festgelegt als das Pixel, welches in gleicher Entfernung den größten Höhenunterschied zu x aufweist (HIEN & TRUNG, 2004).

Die Fließrichtungen können genutzt werden, um einen Datensatz zu erzeugen, der die Anzahl von Pixeln enthält, die jeweils in x entwässern. Man erhält sozusagen das Einzugsgebiet von Pixel x.

Zusätzlich kann auch die Lage der einzelnen Flüsse festgestellt werden und damit auch deren Einzugsgebiet an jedem Punkt entlang ihres Flussbettes.

3 Drainagesystem

In Abbildung 1 fällt eine Anzahl an parallelen Flussläufen auf. Verschiedene Autoren betrachteten in der Vergangenheit jeweils einzelne Täler um Hinweise auf tektonische Beeinflussung zu finden. RICHTER postulierte 1955 bereits eine „Zschopautalstörung“ während KÄUBLER (1959) Beweise für die Existenz einer „Flöhatalstörung“ aufzeigt.

An dieser Stelle soll die Zschopau als Beispiel angebracht werden, da sie mit einer N-S Richtung vom Großteil der anderen Flüsse im Erzgebirge abweicht. Der Großteil ihrer Zuflüsse zeigt diese Richtung ebenfalls. Stellvertretend für die Flüsse des Erzgebirges wurde die Fließrichtung der Zschopau und ihrer Hauptzuflüsse untersucht (Abb. 2).

Zur Analyse der Fließrichtungen ist es notwendig, die Mäander zu reduzieren. Die Flüsse wurden von Hand „begradigt“. Um dennoch objektiv zu bleiben, wurde ein 500m-Puffer um die Flüsse gelegt und deren Hauptrichtung unter Einhaltung dieses Puffers als Gerade eingezeichnet. Die Richtung dieser Linien kann dann mühelos bestimmt werden durch:

$$\alpha = 90^\circ + \arctan (\Delta x/\Delta y) \quad [1]$$

Um statistisch sinnvolle Diagramme zu erhalten wurden die erhaltenen Richtungen nach ihrer Länge gewichtet. Dazu wurden die Kilometerzahlen gerundet der Messwert für jeden Kilometer genutzt. Das heißt: wenn ein Flussabschnitt auf 3,2 Kilometern eine Richtung von 20° zeigt, werden diese 20° 3 mal eingetragen. Erst durch dies Wichtung wird eine Vorzugsrichtung sichtbar (Richtungsrose in Abb.2).

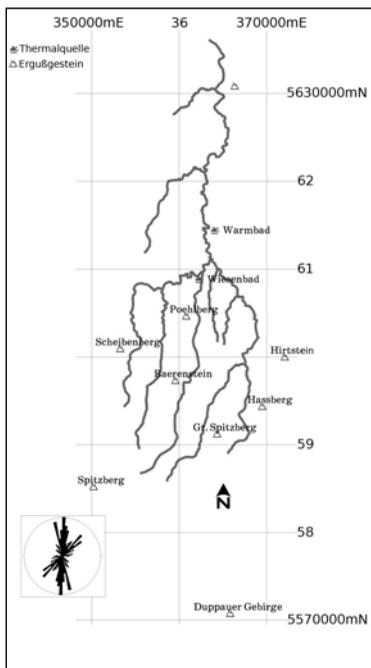


Abb. 2: Die Zschopau und ihre Zuflüsse; links unten: Richtungsrose der Fließrichtungen

Im Falle der Zschopau sind weitere Auffälligkeiten zu beobachten. BAUER (1955) stellte bereits fest, dass die einzigen beiden Thermalbäder in Sachsen (Wiesenbad und Warmbad) sich im Zschopautal befinden. Dieser Hinweis auf vulkanische Aktivität wird verstärkt durch das Vorhandensein einiger tertiärer Basaltreste die in Abb. 2 zu finden sind. Auch diese vulkanischen Reste treten entlang der Zschopau und ihrer Zuflüsse gehäuft auf.

Verlängert man die angenommene „Zschopautalstörung“ nach Süden, so trifft man genau auf das Duppauer Gebirge, den größten Tertiären Vulkan des Erzgebirges.

Diese N-S-Richtung wurde auch bei bekannten Störungen in der Umgebung festgestellt.

Es spricht demnach alles dafür, dass der Lauf der Zschopau stark tektonisch beeinflusst ist.

Andere interessante Aspekte sollte die Methode von STOYAN & STOYAN (1983) bringen. Es ist mit einer lokalen Korrelation von Kluffnetzen oder Erzgängen und der Fließrichtung der Zschopau zu rechnen. Dabei ist es wichtig, die weniger auffälligen Hauptrichtungen (zum Beispiel nördlich von Wiesenbad, ESE-Richtung) zu untersuchen.

Es spricht demnach alles dafür, dass der Lauf der Zschopau stark tektonisch beeinflusst ist. Andere interessante Aspekte sollte die Methode von STOYAN & STOYAN (1983) bringen. Es ist mit einer lokalen Korrelation von Kluffnetzen oder Erzgängen und der Fließrichtung der Zschopau zu rechnen. Dabei ist es wichtig, die weniger auffälligen Hauptrichtungen (zum Beispiel nördlich von Wiesenbad, ESE-Richtung) zu untersuchen.

4 Längsprofile

Um quantitativ mit longitudinalen Flussprofilen arbeiten zu können, ist es nötig, deren Form mathematisch beschreiben zu können.

4.1 Das Gleichgewichtsprofil

Über die generelle Form eines Gleichgewichts- Profils im humiden Klima herrscht Einigkeit. Man erwartet eine nach oben konkave Form. Das bedeutet, das Gefälle des Flusses ist nahe

der Quelle sehr groß und nimmt kontinuierlich bis zu Mündung hin ab, darf aber aus einfachen physikalischen Gründen nie Null erreichen. Unterschiedliche Funktionen können an diese konkave Kurve angepasst werden.

Eine unüberschaubare Anzahl an Einflussfaktoren kann zur Erklärung der Konkavität herangezogen werden, von denen jeder einzelne unter Vernachlässigung anderer Parameter in der Lage ist, Konkavität zu erklären. Sowohl der Einfluss von Zuflüssen, gleichförmige Subsidenz und wellenförmiges Progradieren als auch die Verringerung der Partikelgröße durch Abrasion ermöglichen eine mathematische Formulierung des Profils, die dem erwarteten Gleichgewichtsprofil entspricht (SINHA & PARKER, 1996).

Wenn man versucht, diese konkave Form exakt zu beschreiben, taucht eine unüberschaubare Anzahl verschiedener Einflussfaktoren auf, die alle berücksichtigt werden müssten. Falls es gelingen sollte, alle diese Faktoren gleichzeitig in einer mathematischen Funktion unterzubringen, würde sich eine sehr sperrige Formel ergeben, die für die Verwendung bei der Analyse von Längsprofilen eher unpraktisch wäre.

Beobachtung und Vergleich ist ein weiterer Weg, Flussprofile mathematisch zu beschreiben. Eine solche empirische Formel wurde 1973 von HACK veröffentlicht:

$$H = C - k \cdot \ln(L), \quad [2]$$

wobei H der Höhe und L der Länge von der Quelle aus gemessen entsprechen. C und k sind Konstanten.

Ein Fluss befindet sich im Gleichgewicht, wenn gerade die richtige Kombination aus Wassermenge und Gefälle vorliegt, damit der Fluss fließen und das durch die Zuflüsse gelieferte Material abtransportieren kann. Umwelteinflüsse wie zum Beispiel die Sedimentfracht, die Temperatur und die Vegetation können sich sehr rasch ändern und den Fluss so aus dem Gleichgewicht bringen. Auch tektonische Hebung oder das Anlegen von Stauseen kann dies bewirken. Ein Abweichen vom Gleichgewichtsprofil bewirkt in jedem Fall Erosion oder Sedimentation.

Im Falle von tektonischer Hebung erwartet man sogenannte Knickpunkte. Dabei handelt es sich um Flussabschnitte, die für ihre Position im Profil zu steil sind. Durch diese Versteilung des Gefälles nimmt die Strömungsenergie zu und Erosion tritt auf. Diese Erosion wiederum verändert den Knickpunkt so lange, bis das Profil sich wieder im Gleichgewicht befindet. Je nach Beschaffenheit des Untergrundes werden die Knickpunkte unterschiedlich verändert.

So kann also paralleles Zurückschreiten auftreten, wenn das Flussbett oberhalb des Knickpunktes durch eine relativ geringmächtige erosionsresistente Lage gebildet wird. Bei gleichförmig wenig resistentem Gestein wird neben dem Zurückbauen des Flusses zusätzlich der Knickpunkt erodiert. Das bedeutet, dass Material an der Oberkante abgetragen und an der Unterkante angelagert wird.

Eigentlich erwartet man, dass sich das Strömungsmuster mit dem Gefälle ändert. Im Erzgebirge ist das aber kaum zu beobachten, da auch steilere Abschnitte selten die Grenzwerte für ein abweichendes Strömungsmuster überschreiten.

4.2 Der Gradientindex

Im Erzgebirge findet man nur sehr wenige Flüsse die sich nachweislich im Gleichgewichtszustand befinden. Um verschiedene Knickpunkte miteinander vergleichen zu können wurde der Gradientindex (SL) nach HACK (1973) genutzt, der das Gefälle mit Rücksicht auf die zu erwartende Form eines Gleichgewichtsprofils quantifiziert. Das bedeutet, dass steile Abschnitte nahe der Quelle nicht überbewertet werden.

$$SL = \Delta H / (\ln(L_1) - \ln(L_2)) \quad [3]$$

Hierbei ist ΔH der Höhenunterschied zwischen den Punkten L_1 und L_2 entlang des Profils. L_1 und L_2 wird jeweils von der Quelle aus gemessen.

Diagramm 1 zeigt die Berechnung des Gradientindex und das Ergebnis für einen einzelnen Bach am Erzgebirgsabbruch (Egerzufluss). Man kann beobachten, dass der untere Teil des Flusses mit $SL = 166$ einen größeren Gradientindex aufweist als der oberste Teil (79), obwohl beide Abschnitte etwa dasselbe Gefälle besitzen. Der Gradientindex „wichtet“ die Gefällewerte sozusagen abhängig vom Abstand zur Quelle.

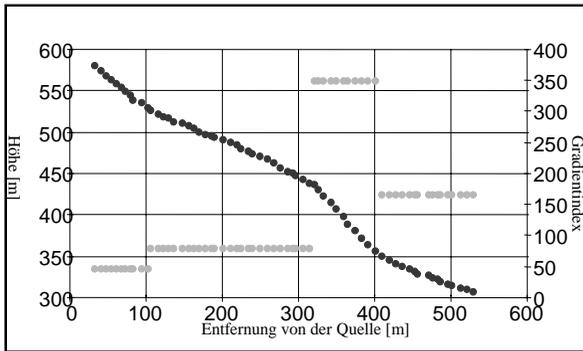


Diagramm 1: longitudinales Profil eines Egerzuflusses (dunkel) und dazugehöriger Gradientindex (hell)

Die Störungen, die für die dort gefundenen Knickpunkte verantwortlich sein könnten. WETZEL & FRANKE scheinen aber nicht so weit im Osten Lineationen kartiert zu haben, weshalb es vorstellbar ist, dass dort Störungen zu finden sind, die nicht kartiert wurden.

Zusätzlich wurde an der Flöha und der Zschopau der Versuch unternommen, die verantwortlichen Störungen im Gelände ausfindig zu machen. Es zeigt sich, dass es sich vermutlich selten um einen einzelnen Punkt im Profil handelt. Stattdessen findet man in kurzen Abständen immer wieder kleinere Verteilungen in Form von Stromschnellen. Die Arbeit im Gelände wird durch die starke Nutzung des Gebietes erschwert. An vielen Stellen werden die steileren Abschnitte genutzt um Mühlen zu betreiben. Zu diesem Zweck mussten Wehre angelegt werden, die zwar das Gefälle im gesamten nicht beeinflussen, aber die Ursachen verdecken.

4.2 Analyse der Beziehung von Gefälle und Einzugsgebiet

Aus dem digitalen Geländemodell kann weiterhin auch das Einzugsgebiet des Flusses für jedes Pixel ausgerechnet werden. Dieser Wert ist eine Funktion der Wassermenge, die sich an dieser Stelle im Fluss befindet. Eine bekannte Gleichung der Hydrologie sagt aus, dass

$$Q = k_q A^c, \quad [4]$$

In Abbildung 3 wurde der Gradientindex für alle untersuchten Flüsse in die Karte übertragen. Die Linien zeigen ein Störungssystem, welches von WETZEL & FRANKE (2001-04) anhand von Satellitendaten kartiert wurde. Man erkennt, dass der Erzgebirgsabbruch deutliche und starke Knickpunkte aufweist. Auch im Westen des Untersuchungsgebietes zeigen sich markante Übereinstimmungen. Lediglich im Osterzgebirge fehlen

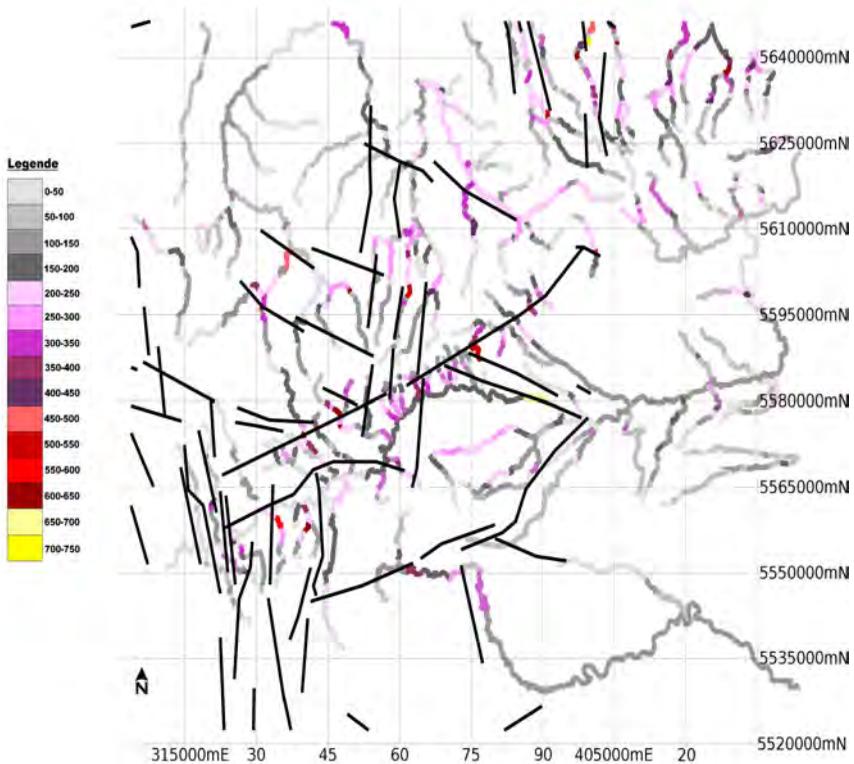


Abb. 3: Der Gradientindex für alle Flüsse des Untersuchungsgebietes in die Karte übertragen (der Kartenausschnitt entspricht Abb1), schwarze Linien sind ein durch WETZEL & FRANKE (2001-04) aus Satellitendaten kartiertes System von Lineationen.

wobei Q dem Abfluss und A dem Einzugsgebiet entspricht. Der Wert k_q ist ein dimensionaler Koeffizient und c ist eine Konstante. Die Höhe des Flussbettes zu einem bestimmten Zeitpunkt entsteht durch das Gegenspiel von Hebung (U) und Erosion (E).

$$dz/dt = U - E = U - K A^m S^n \quad [5]$$

Die Erosion setzt sich wiederum aus dem Erosionskoeffizienten (K), dem Gefälle (S) und der Wassermenge, ausgedrückt durch das Einzugsgebiet (A) zusammen. Die Werte m und n sind Konstanten (KIRBY & WHIPPLE, 2001; WOBUS et al., 2003).

Befindet sich ein Fluss im Gleichgewichtszustand, so findet keine Änderung der Höhe statt, dz/dt wird also 0. Die Gleichung lässt sich dann umstellen zu:

$$S = k_s A^{-n} \quad [6]$$

dabei entsprechen

$$\theta = m/n \quad [7] \quad (\text{der Index der Konkavität})$$

$$k_s = (U/K)^{1/n} \quad [8] \quad (\text{Index der Steilheit})$$

Wenn das Profil wirklich im Gleichgewicht ist und wenn Hebungsrate und Erosionskoeffizient entlang des gesamten Profils gleich sind, so erwartet man also, dass das Gefälle eine Potenzfunktion des Einzugsgebietes darstellt, die es ermöglicht, die beiden Indizes abzulesen. Im Erzgebirge trifft das jedoch für sehr wenige Flüsse zu. Es ergibt sich ein Diagramm, dessen Gefälle deutlich größer ist, als man bei gegebenen Einzugsgebiet erwarten sollte (Diagramm 2) An solchen Flussabschnitten findet derzeit Erosion statt, was auch im Gelände zu beobachten ist. Der Fluss hat dort die Auelehme oft bis zu einem Meter tief eingeschnitten.

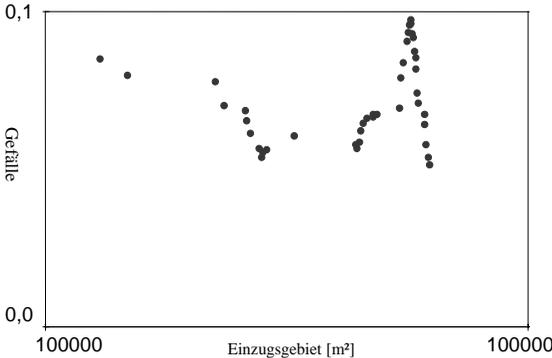


Diagramm 2: Beziehung von Einzugsgebiet und Gefälle. Der Fluss aus Diagramm 1 wurde auch hier verwendet. Man erwartet eine gerade Linie nach Gleichung [6]

Die Suche nach der Ursache für die jeweiligen Knickpunkte ist manchmal nicht eindeutig, da sie sowohl in der Hebung an Störungen als auch in unterschiedlichen Erosionskoeffizienten verursacht werden können (Gleichung [8]). Unterschiede im Erosionskoeffizienten entstehen durch Wechsel in der

Lithologie, die im Erzgebirge häufig sind. Es ist also nötig, die Längsprofile mit der jeweiligen Geologie zu unterlegen, um Aussagen bezüglich der Hebung treffen zu können.

5 Diskussion und Auswertung

Die Karte (Abb.3) zeigt deutlich, dass auf einigen Störungen in jüngster Zeit Bewegungen stattgefunden haben müssen. Man muss allerdings bedenken, dass die anstehenden Gesteine vergleichsweise erosionsresistent sind. Es wird daher länger dauern als im Lockergestein, bis das Gleichgewichtsprofil erneut eingestellt ist. In der Geologischen Karte erkennt man, dass viele Knickpunkte mit Gängen sauren Gesteins assoziiert sind. Dort kann die Erosion nicht so schnell ablaufen. Das Gleichgewichtsprofil wird über einen längeren Zeitraum nicht wieder erreicht. Mithilfe der Erosionsraten dieser Gesteine könnte man sich eventuell eine Vorstellung machen, wie lange ein Fluss im Erzgebirge zur Equilibrierung braucht und wann dann zuletzt tektonische Aktivität vorhanden gewesen sein muss. Der Gradientindex kann mit verschiedenen tektonischen Karten verglichen werden. Eine genaue Untersuchung der Flusserassen könnte eventuell helfen eine Vorstellung der Erosionsraten zu bekommen. Weiterhin sollte es möglich sein, die Entwicklung der Knickpunkte in der Zeit anhand der Terrassen zu verfolgen.

Eine zusätzliche Möglichkeit um Erosions- und Hebungsdaten abzuschätzen bieten solche A-S-Diagramme (s. Abschnitt 4.3), bei denen der Fluss nachweislich im Gleichgewicht ist, also eine Potenzfunktion vorliegt. Sowohl k_s ($0,002 - >20000$) als auch θ ($0,25 - 0,7$) sind re-

lativ starken Schwankungen unterworfen, deren Ursachen bisher nicht geklärt sind. Es soll in Zukunft auch untersucht werden, ob die Lithologie mit diesen Schwankungen in Verbindung zu bringen ist.

Die Suche nach der Ursache für die jeweiligen Knickpunkte ist manchmal nicht eindeutig, da sie sowohl in der Hebung an Störungen als auch in unterschiedlichen Erosionskoeffizienten verursacht werden können. (Gleichung [6])

Die vertikale Auflösung der SRTM- DGM ist zwar recht genau, aber bei einer horizontalen Auflösung von 90 m ist es nicht möglich, ein Wehr oder kleine Stromschnellen in einem Fluss oder Bach zu erfassen, der unter Umständen nur um 1m breit ist. Einige Profile sollen deshalb im Gelände mithilfe von GPS und Nivellierungen verfeinert werden.

6 Literaturverzeichnis

- CZEGA, W., K. BERENDS & S. BRAUNE: Die Qualität der SRTM- Höhendaten und ihre Verwendbarkeit in GIS, (http://www.geo.tu-freiberg.de/hydro/vorl_portal/gis_kurs)
- HACK, J. T., 1973: Stream profile analysis and stream gradient index, Jour. Research U. S. Geol. Survey, vol.1, no.4, S. 421-429
- HIEN, T. T. & TRUNG, L. V., 2004: Aster Data in Monitoring Flood Application, Case study: The Kon – Ha Thanh River_Binh Dinh, International Symposium on Geoinformatics for Spatial Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences 2004
- JENSON, S.K. & J.O. DOMINGUE ,1988: Software tools to extract topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 54, no. 11, p. 1593-1600.
- KÄUBLER, R., 1959: Die Großformen des Erzgebirges, Wiss. Z. Univ. Halle, Math.-Nat. VIII, 4/5, S. 631-640
- KIRBY, E. & K. X. WHIPPLE, 2001: Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis, Geology, vol.29, no.5, S. 415-418
- RICHTER, H., 1955/56: Beiträge zur morphologischen Untersuchung des Erzgebirges, Wiss. Z. Univ. Leipzig, Math.-Nath. Reihe, Heft 5, S. 543-559
- SINHA, S. K. & G. PARKER, 1996: Causes of concavity in longitudinal profiles of rivers, Water Resourc. Res., vol.32, no.5, S. 1417-1428
- STOYAN, D. & H. STOYAN, 1983: Über eine Methode zur Quantifizierung von Korrelationen zwischen geologischen Liniensystemen, Zeitschrift für angewandte Geologie, Bd. 29, Heft 10, S. 512- 517
- WETZEL & FRANCKE, (2001-04): Lineationen der BRD aus Satellitendaten (unveröffentlicht)
- KIRBY, E. & K. X. WHIPPLE, 2001: Quantifying differential rock-uplift rates via stream profile analysis, Geology, vol.29, no.5, pp.415-418
- WOBUS, C. W., K. V. HODGES & K. X. WHIPPLE, 2003: Has focused denudation sustained thrusting at the Himalayan topographic front?, Geology, vol.31, no.10, pp.861-864

Tektonische Untersuchungen im Raum Vogtland-Leipzig mit Hilfe von Fernerkundung

DANIEL POHL¹, HANS-ULRICH WETZEL² & GOTTFRIED GRÜNTAL³

Neben der Schwarmbebenseismizität des Vogtlandes treten Einzelbeben bzw. Bebencluster gehäuft in einer Zone nördlich des Vogtlandes bis etwa zum Raum Leipzig, einschließlich der Geraer Bucht, auf. Im Zusammenhang mit diesen Beben werden Tiefenstörungen in N-S bzw. NNE-SSW streichender Richtung vermutet, die bisher nicht zweifelsfrei nachgewiesen sind. Sie treten deshalb im Kartenbild nicht auf oder sind unterrepräsentiert.

Ziel der Untersuchung war es, trotz starker anthropogener Einflüsse und geschlossener Vegetationsdecke, mögliche Auflockerungs- bzw. Störungszonen zu erkennen und eine Verbindung zu den seismischen Ereignissen herzustellen. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in Neuberechnungen der Erdbebengefährdung ein.

Im Ergebnis der Neubearbeitung entstand eine Lineationskarte die eine Vergitterung unterschiedlicher Störungssysteme zeigt. Während im Vogtland mit seinen Grundgebirgsauftragungen Lineationen mit Streichrichtungen der Gera-Jachimov-Zone und Nord-Süd streichende Lineationen dominieren, treten im Gebiet zwischen Zwickau und Altenburg zusätzliche, parallel zum Erzgebirgsabbruch streichende Elemente in Erscheinung, die von ebenfalls vorhandenen Nord-Süd streichenden Lineationen nicht durchschlagen werden. Im Gebiet der Leipziger Tieflandsbucht konnten trotz starker anthropogener Überprägung und einem weniger ausgeprägtem Relief ähnliche Beobachtungen gemacht werden.

1 Einleitung

Diese Arbeit entstand als Teilbeitrag im Rahmen des Projektes „Risikokarte Deutschland“ unter Federführung des „Center for Disaster Management“ (CEDIM), einer Kooperation des GFZ Potsdam und der Universität Karlsruhe. Die Ergebnisse fließen in Neuberechnungen des Erdbebenrisikos in Deutschland ein. Wichtige Vorarbeiten wurden bereits durch die Interpretation von Fernerkundungsdaten von WETZEL & FRANZKE (unveröff.) geleistet.

Die Erkundung von Störungslinierungen mit Hilfe optischer und aktiver Fernerkundungssysteme beruht im wesentlichen auf Erfahrungen aus ariden oder semiariden Gebieten ohne Vegetationsbedeckung. In Hebungsbereichen mit Grundgebirgsauftragungen sind zum Beispiel Blattverschiebungen als morphologisch markante Einschnitte im Satellitenbild sehr gut erkennbar. Auch die in ariden Senkungsgebieten morphologiebestimmenden temporären Flusssysteme sind tektonisch vorgeprägt.

In humiden Gebieten dagegen behindert eine geschlossene Vegetationsdecke die Identifizierung von tektonischen Lineationen und Versätzen in Gesteinen. Erschwerend kommen in Mitteleuropa eine glaziale Überprägung der Tieflandsgebiete sowie eine strukturverschleiernde Infrastruktur hinzu. Das Gewässersystem ist zum Teil künstlich verändert, Leitungstrassen führen zu Veränderungen in der Bodenfärbung.

Untersuchungen mit kleinmaßstäblichen Satellitenfotos (KRULL 1979, BANKWITZ et al. 1979, KRULL & SCHMIDT 1989) zeigten eine Häufung von großen linearen Elementen im Untersu-

¹ Daniel Pohl, GeoForschungsZentrum Potsdam, Sektion 5.3, Telegrafenberg, 14473 Potsdam, e-mail: dpohl@gfz-potsdam.de

² Dr. H. U. Wetzels, GeoForschungsZentrum Potsdam, Sektion 1.4, Telegrafenberg, 14473 Potsdam, e-mail: wetz@gfz-potsdam.de

³ Dr. G. Grünthal, GeoForschungsZentrum Potsdam, Sektion 5.3, Telegrafenberg, 14473 Potsdam, e-mail: ggrue@gfz-potsdam.de

chungsgebiet. Im Verschnitt von modernen instrumentellen seismologischen Daten mit der Neuinterpretation von Lineationen mit Hilfe einer Kombination von verschiedenen Satellitendaten sollte versucht werden die rezent seismisch aktiven Störungen zu identifizieren.

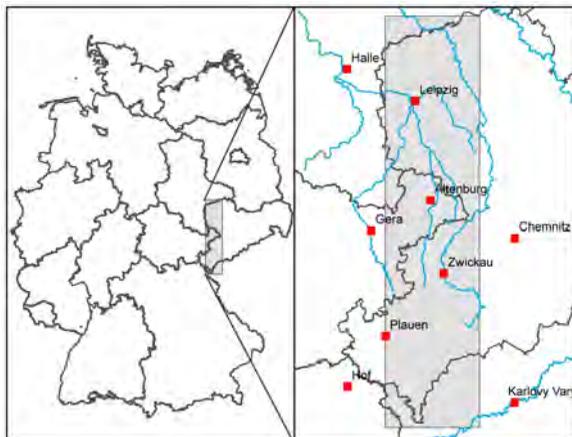


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes

1.1 Geologische Situation

Das betrachtete Gebiet ist durch eine Vielzahl von Gesteinen unterschiedlicher geologischer Epochen gekennzeichnet. Als regionale Einheiten sind das Vogtland, das Erzgebirgebecken, das Geraer Becken, der Ronneburger Horst und die Leipziger Tieflandsbucht zu nennen.

Im Vogtland ist ein fast vollständiges stratigraphisches Profil des Paläozoikums aufgeschlossen. Dieses wurde vom Kirchberger, Bergener und Eibenstocker Granit durchbrochen und während der variszischen und alpidischen Orogenese tektonisch gegliedert. Während PIETZSCH (1962) noch von überwiegend NW-SE streichenden Störungen ausgeht, fanden im Zuge der Lagerstättenprospektion aufgefundene N-S und NE-SW streichende Störungen erst in neuere Kartenwerke Eingang (BGR 1998, 1999 und LFUG 1996).

Umrahmt wird das Vogtland von der Münchberger Gneismasse im Südwesten, dem Egerbecken im Süden und dem Kirchberger Granit bis zum Westerzgebirge im Osten. Die Marienbader Störung, als prägendes tektonisches Element, schlägt vom östlichen Egerbecken bis etwa Markneukirchen bzw. Schöneck durch. Über die weitere nördliche Erstreckung herrscht allgemeine Unklarheit. Eine Möglichkeit ist von KRULL & SCHMIDT (1990) in Einzelsegmenten angedeutet.

Im Norden schließt sich das Erzgebirgebecken an. Diese mit Rotliegend-Sedimenten und Vulkaniten gefüllte Senke entstand durch NW-SE dextrale Extension. Sie erstreckt sich von Werdau-Crimmitschau im Westen bis Hainichen im Osten. Über die Entstehung der westlichen Begrenzung, zum Bergaer Sattel hin, ist wenig publiziert. Für das Gesamtbecken wird eine vulkanotektonische Entstehung im Rahmen eines pull-apart Regimes aus Bohrungen und stratigraphischen Untersuchungen abgeleitet (FISCHER 1991 aus WÜNSCH & SCHNEIDER 2002).

Ein Teil des Erzgebirgebeckens und das Geraer Becken sowie der Ronneburger Horst werden durch NW-SE verlaufenden Störungen der Gera-Jachimov-Störungszone flankiert. Die Abgrenzung der einzelnen Gebiete zueinander ist im Prinzip nur mit N-S streichenden Störungen erklärbar (vgl. MEINHOLD 2005, für das Geraer Becken). Die Teilssegmente Crimmit-

schauer sowie die Pohlener Störung sind innerhalb des Erzgebirgebeckens nicht eindeutig nachvollziehbar und vermutlich durch die Vogtländische Störung versetzt.

Der Ronneburger Horst besteht aus Gesteinen des Ostthüringer Schiefergebirges und wird im nordöstlichen Teil von Sedimenten des Zechsteins und der Trias verdeckt. Er liegt im Kreuzungsbereich der Gera-Jachimov-Störungszone mit dem Bergaer Sattel (LANGE 1995). Außerdem sind untergeordnete N-S und E-W verlaufende Störungen bekannt, die an den übergeordneten NW-SE streichenden Hauptstörungen versetzt werden (LANGE 1995).

Über das Gebiet zwischen Altenburg, Zeitz und Ronneburger Horst ist wenig publiziert. An der Oberfläche finden sich hier unter dünnen quartären Ablagerungen Buntsandsteine der Trias. Der Übergang zur Leipziger Tieflandsbucht erfolgt durch die Buntsandsteinstufe von Zeitz, die mindestens schon seit dem Alttertiär existieren soll (EISSMANN 1975). Vereinzelt Einbrüche an der Erdoberfläche, die vermutlich durch Lösung von Zechsteinsalzen entstanden, wurden in der Nähe von Zeitz beobachtet (WAGENBRETH 1960). Eine tektogene Entstehung für Lösungswasserwegsamkeiten lässt sich bisher nicht belegen.

Die Leipziger Tieflandsbucht ist eine durch känozoische Ablagerungen geprägte flache Ebene. Sie wird im Süden und Südwesten von Zechstein und Triasablagerungen und im Osten durch das NW-sächsische Porphyrgelände begrenzt. Für die zentrale Leipziger Tieflandsbucht zwischen Pleiße und Rippach erkannte EISSMANN (1975) eine leichte Verkipfung frühpleistozäner Saaleterrassen, die er auf quartäre Bewegungen zurückführt.

Das Grundgebirge ist durch die sogenannte Hallesche Störung von Halle bis etwa Schkeuditz und die Röthaer Störung bis etwa Bad Lausick gegliedert. Beide sind verbunden durch eine N-S-Verwerfung die sich aus der Interpretation paläozoischer Gesteine mit einem intrudierten Granit ergibt. Die Verstellungen in den Braunkohleschichten der Leipziger Tieflandsbucht werden eher auf subrosive Setzungserscheinungen als auf tektonische Prozesse zurückgeführt (EISSMANN 1975).

Der Bereich der nördlichen Leipziger Tieflandsbucht ist zudem von glazigenen Sedimenten geprägt und oberflächlich durch ein eher ruhiges Drainagesystem gegliedert. Kartenwerke, als Ergebnis von Prospektionsuntersuchungen am Delitzscher Karbonatitkomplexes, geben Hauptstörungsrichtungen von NW-SE-Richtung im Untergrund an.

1.2 Seismologische Situation

Das Untersuchungsgebiet ist durch zwei Arten seismischer Ereignisse geprägt. Zum einen treten Schwarmbeben in den bekannten Clustern: Nový Kostel, Kraslice-Klingenthal, Plauen, Marktredwitz und Mariánzké Lázně auf. Zum anderen ereigneten sich sporadische Einzelbeben diffus verteilt in ganz Mitteleuropa. Beben größeren Ausmaßes sind aus der Bearbeitung Historie bekannt. Die wichtigsten sind das Mitteldeutsche Beben von 1872 bei Gera (GRÜNTAL 1992), das Beben von Rochlitz 1908 (makroseismische Karte nach GRÜNTAL 1990, unveröff.) und das ehemals „Torgau-Erdbeben“ genannte von 1553, dass nach seiner Neuinterpretation durch GRÜNTAL & FISCHER (1998) in der Gegend zwischen Grimma und Rochlitz stattfand.

Als Schwarmbeben wird das gehäufte Auftreten kleinerer seismischer Ereignisse in einem relativ eng begrenzten Gebiet bezeichnet. Sie sind normalerweise an Extensionstektonik oder an Vulkanismus gebunden. Im Vogtland liegen die Herdflächen der seismischen Ereignisse in Tiefen zwischen 4 und 16 km, im übrigen Sachsen im Bereich von 8 bis 14 km (GRÜNTAL et al. 1985). Das umfangreichste Datenmaterial ist für den Bebenschwarm 1985/86 publiziert. Er trat in einer Herdtiefe von etwa 7 km auf. Die Magnitude des größten Einzelbebens dieses Schwarms betrug $M_L=4,6$. Die von KOEHLER et al. (1989) publizierten Herdflächenlösungen der größten Beben dieses Schwarmes zeigen hauptsächlich schiefen Abschiebungssinn mit geringen sinistralen N-S gerichteten Versätzen. GRÜNTAL et al. (1990) entwickelten ein seismotektonisches Modell des Erdbebenschwarmes 1985/86.

2 Datenbasis und Methodik

Die neotektonischen Analyse beruht auf der Erkenntnis, dass sich jüngste tektonische Prozesse der Erdkruste an der Landoberfläche widerspiegeln. Diese ist aber dem Wechselspiel von Hebung und Senkung, Erosion und Sedimentation ausgesetzt. Neotektonische Bewegungen können daher zu einer Vielzahl unterschiedlicher Erscheinungen führen. Die Bewegungen führen zu Versätzen in der Lithologie und als Folge davon zu gestörten Drainagesystemen, einem geänderten Einfallen der Landoberfläche, eventuell zur Entstehung von Schichtstufen sowie zur Anlage von Feuchtstellen und Vegetationsänderungen.

Ist die großflächige Sedimentationsrate höher als der durch tektonische Prozesse entstandene Geländeunterschied werden diese Bewegungen von jungen Sedimenten verdeckt. Verdeckte Strukturen können, wenn überhaupt, nur durch Interpretation multispektraler Daten erkannt werden. Andererseits sind ausgeprägte morphologische Strukturen oft Ausdruck einer starken aktiven Tektonik.

Die Erstreckung einzelner Störungen in die mittlere Kruste ist i.d.R. nicht genau bekannt, auch die Bestimmung der Tiefenlage unterliegt vielen Unsicherheiten. Dennoch ist ein Verschnitt geologischer Karten mit lokalisierten Erdbebenereignissen aus Datenbanken und mit Hilfe der Fernerkundungsinterpretation ein wichtiges Hilfsmittel zum Erkennen selbst schwach ausgeprägter seismisch aktiver Strukturen.

2.1 Datenbasis

Neben umfangreichen Erdbebenkatalogdaten standen X-Band Radarintensitätsbilder, SRTM Höhenmodelle, Mosaike aus Asterhöhenmodellen, aus Astermultispektralbändern und aus Landsatzenen (193-24,25; 7.7.1989) zur Verfügung. Zudem wurden verschiedene georeferenzierte topographische und geologische Kartenwerke in die Interpretation einbezogen.

2.2 Methodik

Bei der Interpretation wurden hauptsächlich Kanten von Höhenunterschieden, lineare Elemente des Drainagesystems, Täler aller Art, weit aushaltende Bodenwellen, Bodenverfärbungen und Feuchtstellen kartiert.

Die Extraktion der lineare Elemente (Lineationen) erfolgte mit Hilfe visueller Interpretation in den Programmen ERDAS IMAGINE 8.6 und ArcGIS 9. Um Maßstabeffekte auszuschließen wurde ein Raster mit einer Zellgröße von 10x10 km erzeugt und über das Untersuchungsgebiet gelegt. Die Bearbeitung der Zellen erfolgte nacheinander im fixen Maßstab 1:50.000. Das ermöglicht ein homogenes Ergebnis mit lokaler Auflösung über ein großflächiges Gebiet. Regionale und überregionale Lineationen sind bei diesem Maßstab nicht zu erkennen. Sie ergeben sich aber später aus dem Gesamtbild durch Zusammenfassung der kleinen Einzellineationen (Bottom-Up-Prinzip).

Größere Sedimentationsflächen erscheinen in diesem Kartierungsmaßstab relativ ungegliedert.

Im ersten Schritt wurden Radarbilder des X-Bandes der SRTM Mission auf morphologische Rückstrahlkanten und Feuchtstellen untersucht. Hierbei traten Geländekanten senkrecht zur Radarbeleuchtungsrichtung besonders hervor. Im Vergleich mit Aster- und Landsat-Datensätzen konnten rückstrahlende Waldkanten ausgeschlossen werden. Da die Radardaten nur als Einzelstreifen vorlagen und nicht das ganze Untersuchungsgebiet abdeckten, wurden die Ergebnisse später in die Interpretation der Höhenmodelle integriert.

Im zweiten Schritt wurden die Landsat- und Asterdaten auf ein überhöhtes SRTM Höhenmodell drapiert (Bild 2). Damit gelang es Relief- und Multispektraldaten gleichzeitig auszuwer-

ten. Anthropogene Effekte, wie Autobahnen, Waldschneisen und Flussbegradigungen, ließen sich damit sofort ausschließen.

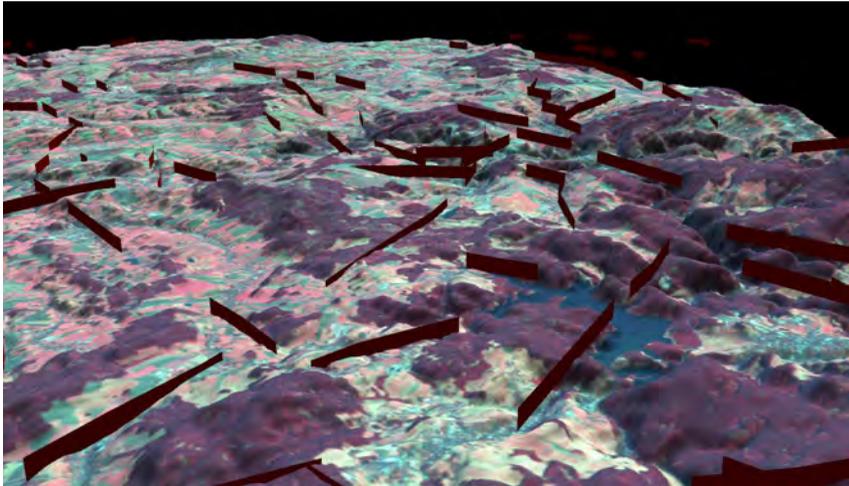


Abb.2: Überhöhte 3D Darstellung des Untersuchungsgebietes mit eingezeichneten Lineationen

Die Methode der 3D Ansichten wurde später wegen ihres enormen Rechenaufwandes zugunsten der Interpretation von unterschiedlich schattierten Höhenmodellen aufgeben.

Der dritte Schritt bestand aus der Erstellung hochaufgelöster schattierter Höhenmodelle aus SRTM Daten mit Hilfe von ERDAS IMAGINE. Benutzt wurden dafür Azimutbeleuchtungswinkel von 0° , 225° und 315° mit einem simulierten Sonneneinfallswinkel von 40° sowie einer zweifachen Überhöhung. Ein verkleinertes Beispiel ist in der Abb. 3a dargestellt.

Nachdem jede Einzelzelle des 10×10 km Bearbeitungsrasters interpretiert war, ergab sich ein Gesamtbild vieler kleiner linearer Elemente. Diese wurden mit einem Punktdatensatz aus der georeferenzierten Datenbank seismischer Ereignisse des GFZ verschnitten.

Für weitere Interpretationen wurden nur Ereignisse ab 1961 mit einer Ortsauflösung von einigen hundert Metern benutzt.

3 Ergebnisse

Drei unterschiedliche Hauptlineationsrichtungen sind im Ergebnis aushaltbar (Bild 3b). Herzyn (NE-SW) und erzgebirgisch (NE-SW) streichende Lineationen als Hauptelemente. Untergeordnet treten N-S streichende, meridonale Lineationen als verbindende Elemente auf.

Damit konnten die Interpretationsergebnisse von KRULL & SCHMIDT (1990) sowie WETZEL & FRANZKE (unveröff.) zum großen Teil bestätigt werden. Durch eine höhere Auflösung gelang jedoch eine bessere Verifizierung der einzelnen Lineationsrichtungen.

Die herzyn streichenden Lineationen bilden Einzelsegmente überregionaler Störungssysteme wie der Marienbader Störung und der Gera Jachimov Störungszone ab. Sie sind im Untersuchungsgebiet nie als weit aushaltende Elemente zu erkennen, sondern ergeben sich durch Aneinanderreihung gut sichtbarer, aber nicht immer eindeutig miteinander verbindender, Einzelelemente.

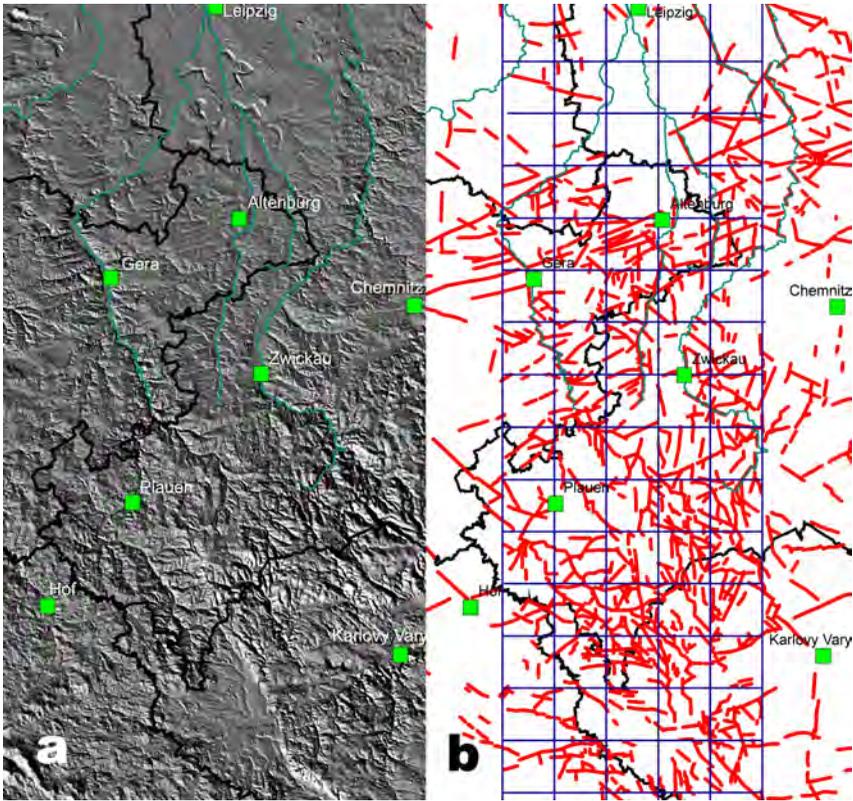


Abb. 3a: Schattiertes Höhenmodell. Von schräg unten links beleuchtet (225°).
 Abb. 3b: Untersuchungsraaster mit eingezeichneten Lineationen.

Bei den erzgebirgisch streichende Lineationen zeigt sich ein ähnliches Bild. Sie treten überraschend häufig auf und sind auch über weite Gebiete zu verfolgen. Als Beispiel sei eine Lineation von Bad Köris über Altenburg bis nördlich von Rochlitz, und vermutlich auch entlang der Schieferhülle des Granulitgebirges bis Döbeln genannt. Die Vergitterung beider Störungssysteme findet dabei im Raum Gera-Ronneburg statt. Meridionale Strukturen treten am ausgeprägtesten im Vogtland auf. Sie beginnen häufig an den Enden herzyn streichender Lineationen und enden an der nächsten herzyn verlaufenden Lineation wieder. Zu sehen ist aber kein Versatz in eine bestimmte Richtung sondern ein zickzackförmiger Verlauf paralleler segmentierter Lineationen. Im Bereich des Erzgebirgebeckens bis etwa Zeitz treten dann meridionale Strukturen sehr untergeordnet auf und werden immer von herzynen und erzgebirgisch verlaufenden Elementen unterbrochen.

In Gebieten mit känozoischen Auflagerungen nimmt die Lineationshäufigkeit rapide ab. Einzige Anhaltspunkte bieten größerer Flüsse, deren Verläufe stark durch Sedimentation und regionales Einfallen geprägt sind.

4 Diskussion

Alle Schwarmbeben liegen mehr oder weniger an einer durch N-S und NW-SE Elemente segmentiert gegliederten Marienbader Störung und deren Fortsetzung nach Norden. Daneben treten sie an parallel zu dieser Störung vorkommenden, ebenfalls segmentierten Elementen auf. Die starke Segmentierung schließt ein Blattverschiebungssystem aus. Es scheint sich vielmehr um ein steiles Abschiebungssystem mit einer gewissen Scherkomponente zu handeln in dem ältere NW-SE Störungen reaktiviert, und durch N-S Störungen verbunden werden. Als möglicher Grund kann eine Bewegung angenommen werden, die den Unterschied zwischen der Hebung des Erzgebirges und der Thüringer Rumpffläche ausgleicht. Der Schwarmbebencharakter auf eng begrenztem Raum und die im Norden gelegenen schwächeren Cluster mit geringer werdender Häufigkeit unterstützen diese These.

Der Bergener und Kirchberger Granit maskieren einen dazu notwendigen stratigraphischen Versatz. Möglicherweise ist dieser auch an die N-S-Störung von Thoßfell (Abb. 4B) zu legen, von der jedoch keine rezent seismische Aktivität bekannt ist. Im Bereich des Bergener und Kirchberger Granit sind keine Schwarmbebencluster, sondern kleinere Einzelereignisse bekannt. Generell treten in diesem Gebiet aber die gleichen Lineationen wie im übrigen Vogtland auf. Unklar ist ob hier ein Spannungsabfall durch kriechen realisiert wird.

Untersuchungen zum in-situ Spannungsfeld zeigen einen kleinregionalen Wechsel im Bereich des Vogtlandes in dem neben Compressionspannungen bedeutende Zugspannungen vorkommen (BANKWITZ et al. 1995).

Mit dem Auftreffen auf die Gera-Jachimov-Zone sind Reliefsausgleichbewegungen nicht mehr notwendig (Abb. 4B und 5).

Im Gera-Ronneburger Kreuzungsbereich treffen sich erzgebirgisch streichende Lineationen, die vom Ostthüringer Hauptsattel bis nördlich des Granulitgebirges reichen, mit Lineationen der Gera-Jachimov-Zone die, aus dem Erzgebirge kommend, bis zum Kyffhäuser verläuft. Vereinzelt wird auch eine überregional N-S-streichende, präkambrisch angelegte Zone als wichtiges tektonisches Vergitterungselement angeführt. Dies stimmt nur insofern, dass einige der vorher beschriebenen N-S-Einzelelemente als mögliche Fortführung der Marienbader Störung die älteren Störungssysteme spitzwinklig schneiden (Elstertal von Greiz bis Gera). Die Vergitterung mehrerer Störungssysteme, die mit der Fernerkundung nachgewiesen werden kann, dürfte die Hauptursache der Seismizität im Gebiet von Gera sein, worauf bereits GRÜNTAL (1992) hinweist. Eine komplett N-S streichende überregionale Zone, wie von KRULL & SCHMIDT (1990) oder RÖLLIG & SÖLLIG (1990) publiziert, konnte jedoch nicht festgestellt werden. Das ist aber möglicherweise dem größeren Bearbeitungsmaßstab geschuldet.

Für die sporadisch auftretenden Einzelbeben konnte kein deutlicher Bezug zu Lineationen hergestellt werden. Interessant sind aber Hinweise, dass in der Nähe von erzgebirgisch streichenden Lineationen einige der größeren historischen Einzelbeben stattgefunden haben. Immer wieder fällt dabei die Gegend nördlich des Granulitgebirges auf. Auch wenn es außerhalb des Untersuchungsgebietes liegt sei hier auf eine Bemerkung von EISSMANN (1975) verwiesen, nachdem zwischen Mulde und Elbe Hinweise auf junge Bewegungen vor allem am Nordrand des Granulitgebirges bei Döbeln existieren, wo die auf dem Grundgebirge liegenden Unteren Döbelner Schotter (frühsaaleiszeitlich) mit 1:85 ein von normalen Werten völlig abweichendes Gefälle aufweisen.

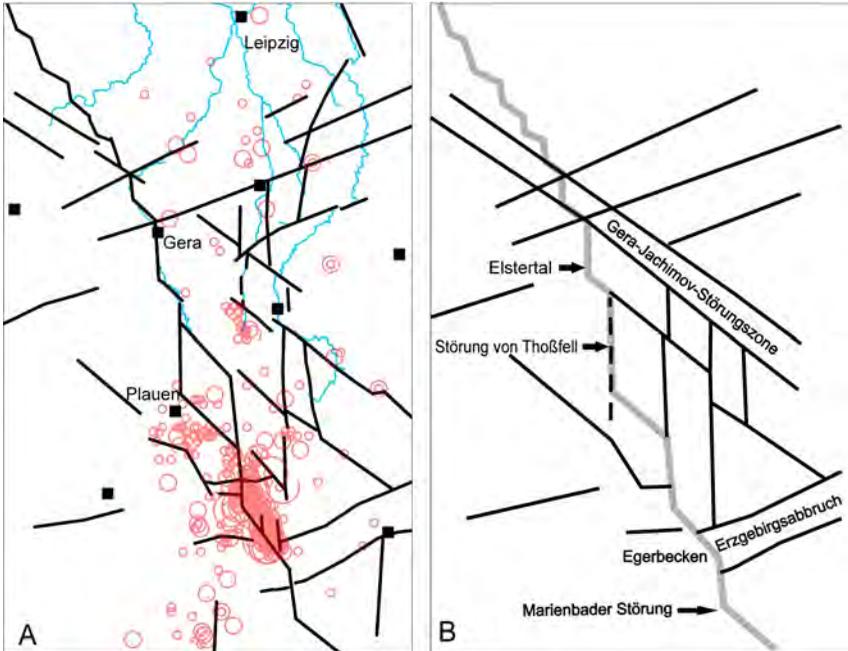


Abb. 4A: Generalisierte Lineationen im Verschnitt mit seismischen Ereignissen seit 1961.
 Abb. 4B: aus 4A entwickeltes tektonisches Modell.

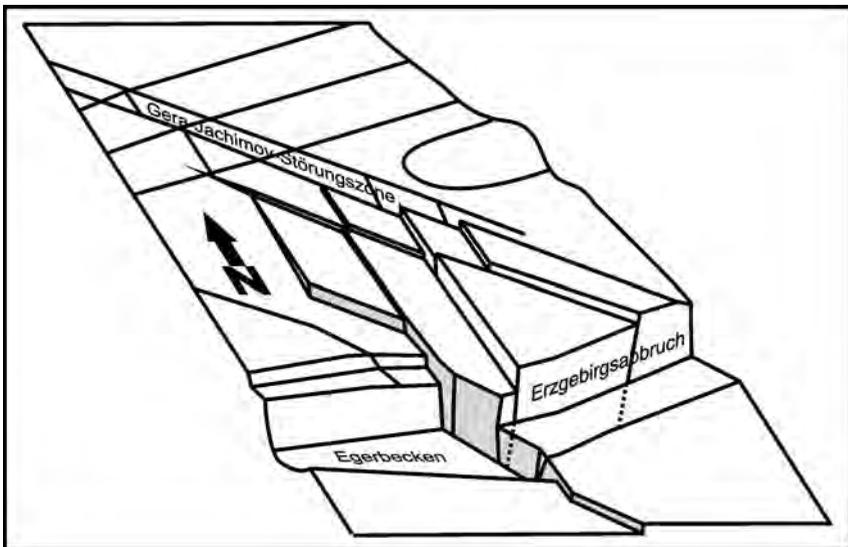


Abb.5: Blockmodell des Untersuchungsgebietes mit grau eingefärbter Marienbader Störung

5 Danksagung

Bedanken möchten wir uns für die fruchtbare Zusammenarbeit bei Dr. Ottomar Krentz, Landesamt für Umwelt und Geologie Sachsen, Prof. K. Stanek, TU Bergakademie Freiberg. Für wichtige Hinweise danken wir Dr. H. J. Franzke, Clausthal-Zellerfeld und Prof. L. Eissmann, Leipzig.

6 Literaturverzeichnis

- BANKWITZ, P., BANKWITZ, E. & FRISCHBUTTER, A., 1979: Fototektonische Interpretation von Mitteleuropa nach Aufnahmen der sowjetischen Wettersatelliten Meteor 25 und 28. Veröff. des Zentralinstitutes für Physik der Erde Nr. 61– Beiträge zur Fernerkundung, Potsdam
- BANKWITZ, P., BANKWITZ, E., FRANZKE, H.J., RAUCHE, H. & DANNAPFEL, M., 1995: In situ Spannungsmessungen in Thüringen und Sachsen, Brandenburgische Geowiss. Beitr. 2, 2 S. 77-94
- BGR 1998: Geologische Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland, Blatt CC4734 Leipzig 1:200000, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
- BGR 1999: Geologische Übersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland, Blatt CC5534 Zwickau 1:200000, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
- EISSMANN, L., 1975: Das Quartär der Leipziger Tieflandsbucht und angrenzender Gebiete um Saale und Elbe : Modell einer Landschaftsentwicklung am Rand der europäischen Kontinentalvereisung, Akad.-Verl., Berlin
- GRÜNTAL, G., BANKWITZ, P., BANKWITZ, E., BEDNÁREK, J., GUTERCH, B., SCHENK, V., SCHENKOVÁ, Z. & ZEMAN, A. 1985: Seismicity and geological features of the eastern part of the West European platform, Gerlands Beiträge zur Geophysik, 94, 4-6, 276-289.
- GRÜNTAL, G., SCHENK, V., ZEMAN, A. & SCHENKOVA, Z., 1990: Seismotectonic model for the earthquake swarm 1985/86 in the focal area Vogtland/West Bohemia. Tectonophysics 174, 369-383.
- GRÜNTAL, G., 1992: The Central German earthquake of March 6, 1872. In: Gutdeutsch, R., Grünthal, G., Musson, R. (Eds.): Historical Earthquakes in Central Europe, Monographs Vol. I, Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt 48, 51-109, Wien.
- GRÜNTAL, G. & FISCHER, J., 1998: Die Rekonstruktion des "Torgau"-Erdbebens vom 17. August 1553. Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge 2, 43-60.
- LANGE, G., 1995: Die Uranlagerstätte Ronneburg Z. geol. Wiss., 23 (5/6), S. 517-526, Berlin.
- LFUG 1996: Seismologische Übersichtskarte des Freistaates Sachsen 1:400000, 1. Ausgabe Landesamt für Umwelt und Geologie, Freiberg
- KÖHLER, W., GROSSER, H. & BORMANN, P. 1989: Investigations of fault plane solutions, spectra and focal processes. – Fault plane solutions – Monitoring and Analysis of the Earthquake Swarm in the region Vogtland/Western Bohemia, ZIPE Veröffentlichung Nr. 110: S. 165-185.
- KRULL, P., 1979: Zum bruchtektonischen Bau des Territoriums der DDR und angrenzender Gebiete nach kosmischen Aufnahmen, Veröff. des Zentralinstitutes für Physik der Erde Nr. 61– Beiträge zur Fernerkundung, Potsdam
- KRULL, P. & SCHMIDT, D., 1990: Geologische Karte der Deutschen Demokratischen Republik – Karte der Fotolineationen kosmischer Aufnahmen 1:500.000; Zentrales Geologisches Institut, Berlin

- MEINHOLD, G., 2005: Unterkarbon und Rotliegend von Gera (Ostthüringen), Geowiss. Mitt. Thüringen, 12, S. 71-77, Jena
- PIETZSCH, K., 1962: Geologie von Sachsen : Bezirke Dresden, Karl-Marx-Stadt und Leipzig, Dt. Verl. der Wiss., Berlin
- RÖLLIG, A. & SÖLLIG, G., 1990: Geologische Karte der Deutschen Demokratischen Republik – Tektonische Karte 1:500.000; Zentrales Geologisches Institut, Berlin
- WAGENBRETH, O., 1960: Ein Erdfall bei Zeitz, Zeitschrift für angewandte Geologie, 7, S.345-346
- WÜNSCH, R. & SCHNEIDER, J.W., 2002: „Workshop Oberkarbon-Untertrias: Prozesse und ihr Timing“ - TU Bergakademie Freiberg, Geologisches Institut 22-23.Juni 2002
- WETZEL, H.U. & FRANZKE, H.J. (unveröff.): Interpretation von Fernerkundungsdaten: Interpretation 2004

I.D.I.O.T.: A FREE AND EASY-TO-USE SOFTWARE TOOL FOR DInSAR ANALYSIS

A. Reigber¹, E. Erten¹, S. Guillaso¹ & O. Hellwich¹

Abstract: This paper presents the I.D.I.O.T. (InSAR Deformation Inspection and Observation Tool) software, developed by the Computer Vision and Remote Sensing Group of the Berlin University of Technology. I.D.I.O.T. aims to simplify the generation of differential interferograms to the simple choice of files of appropriate SAR SLC (single look complex) files. From these files, displacement maps are produced without further user interaction. I.D.I.O.T. is programmed in IDL (Interactive Data Language); a binary edition for non-commercial purposes will be provided free-of-charge via the Internet.

Several examples of deformation maps derived with I.D.I.O.T. over test sites in Iran and Kyrgyzstan are presented.

1 Introduction

In recent years, differential interferometry (DInSAR) using space-borne synthetic aperture radar (SAR) sensors has become an established technique for detecting and monitoring centimetre-scale deformations of the earth's surface, as well as glacier flows and land slides [1]. DInSAR is the study of interference patterns between two SAR images acquired from relatively similar positions. After precise co-registration of the two images, the measured phase difference between two corresponding pixels can be expressed as

$$\Delta\Phi = \Phi_{orbit} + \Phi_{flat} + \Phi_{topo} + \Phi_{defo} + \Phi_{Atmo} + \Phi_{Noise}$$

where Φ_{orbit} denotes the phase effect due to inaccurate orbit information, Φ_{flat} the so-called flat-earth phase generated by the imaging geometry, Φ_{topo} the interferometric phase caused by topography, Φ_{defo} the differential deformation pattern, Φ_{Atmo} the atmospheric effects and Φ_{Noise} the noise contribution. In DInSAR analysis, one is usually interested in the deformation pattern, which requires to eliminate all the other contributions. The orbit error and the atmospheric effect are usually unknown and neglected. The flat-earth component can be calculated from the imaging geometry, while the topographic term requires precise knowledge of imaging geometry and ground topography.

It is well known that DInSAR analyses are complicated and usually require an experienced user, as well as expensive specialised software packages. Consequently, in many cases, potential users are scared off by the alleged complexity and high demands of differential SAR interferometry. However, as it can be seen from the simple expression above, in practice this is not really true: As long as the imaging geometry is precisely known, differential SAR interferometry is an extremely straightforward technique. With the availability of precise orbit information as well as the global digital elevation model (DEM) of the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), control of imaging geometry became a rather simple task, which can be automatised to a high degree.

I.D.I.O.T. is such a software package for fully automatic generation of differential SAR interferograms with a minimum amount of user interaction. Its main purpose is to simplify as much as possible the generation of differential SAR interferograms, even for complete novices in SAR interferometry. This

¹Berlin University of Technology, Computer Vision and Remote Sensing Group, Franklinstraße 28/29, FR3-1, D-10587 Berlin, Germany. Tel./Fax.: ++49-30314-23276/21104, Email: anderl,stephane,esra,hellwich@fpk.tu-berlin.de

is achieved by a fully automatic handling of the SAR data, orbits and topography information. The user has only to specify a reasonable pair of SAR data sets. While processing the data, all steps are implemented having maximum interferogram quality and precision in mind. As output, several meaningful maps for visual interpretation are generated. The current version of I.D.I.O.T., which will be provided as free software, supports only ENVISAT as input data and generates only output for visual interpretation in png-format.

2 Processing Strategy

The quality of differential interferograms is highly based on geometric configuration of satellite orbits and the ground topography. Therefore, I.D.I.O.T. uses a rigorous geometric approach based on precise orbit information and SRTM elevation data. From these data, precise co-registration information, as well as the topographic phase components, can directly be estimated and deformation maps are computed without further inputs. In order to achieve the maximum coherence, I.D.I.O.T. performs the various aspects of advanced InSAR processing, including range adaptive Doppler filtering, topography adaptive range filtering, residual sub-pixel image registration and high-precision interferogram generation. The entire block diagram of I.D.I.O.T. is shown in Fig. 1.

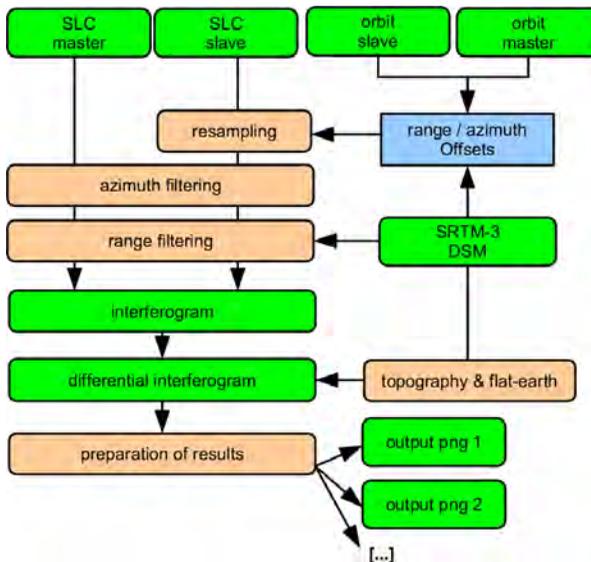


Fig. 1: I.D.I.O.T. processing chain

In the following, the different tasks of data processing are described more in detail.

2.1 DEM backward-geocoding

After reading the SLC data, the DEM information has to be projected onto the slant-range geometry of

the master image. To do so, first the required SRTM patches are mosaicked together. Then, for each pixel of the resulting DEM, the shortest line-of-sight (LOS) distance r_{min} between the pixel and the master orbit is calculated. From this, the respective slant-range pixel number p_{rg} of this DEM element can be derived using

$$p_{rg} = (r_{min} - r_0) / \delta_{sr}$$

with r_0 denoting the range delay and δ_{sr} the slant-range resolution of the sensor. The azimuth pixel number p_{az} is directly determined by the intersection of the estimated LOS direction with the master orbit. Once all the p_{rg} and p_{az} and corresponding heights are known, the DEM is projected to slant-range geometry at full-resolution by a triangulation between the know data points.

2.2 Slave image co-registration

The second step in the processing is the precise co-registration of the slave image onto the geometry of the master image. At this stage of the processing, the master geometry is already fully determined; for each image pixel the precise height is known from the backward-geocoded DEM. Therefore, the slave image co-registration in range can be reduced to a measure of the difference in slant-range distances

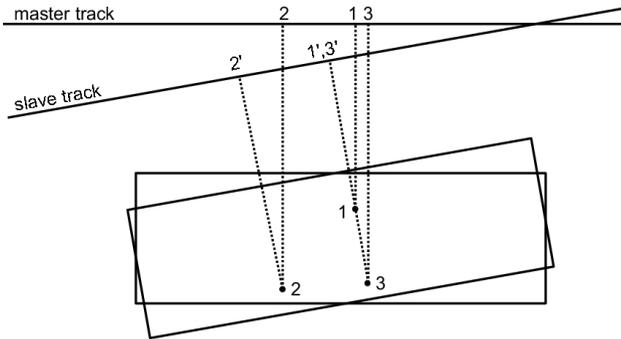


Fig. 2: Co-registration of master and slave image

between a given pixel of the backward-geocoded DEM and the two orbits. Similarly, the co-registration in azimuth is the difference in the intersection points of the two LOS directions with master orbit and slave orbit, respectively [2].

In Fig. 1, this technique is illustrated: First, the precise slant-range distances of the pixels in the master image are calculated from their 3D position in space, known from the backward-geocoded DEM. Then, using the slave orbit, it is calculated which slant-range distance the points possess in the slave image and at where the slave LOS intersects with the slave orbit. From this information, image offsets can be derived without touching the image data itself.

One minor problem is that, with this approach, one depends on the quality of the orbits and on precise timing information in the data headers. In practice, to correct for such errors, it is necessary to perform a calibration of a global offset between the images. In I.D.I.O.T. is done by a residual correction based on cross-correlation, although it has been found that in most cases the estimated residual error is in the order of only $1/10^{\text{th}}$ of a pixel.

After the co-registration parameters are known, the slave image is resampled to the master geometry by interpolation based on oversampled cubic-convolution.

2.3 Interferogram generation

The most important step in interferometric processing is the generation of the interferogram itself, which has to be performed with the maximum quality in mind. In I.D.I.O.T., first a range dependent filtering of the different Doppler-centroids is performed. Then the image is range-filtered with a topography adaptive approach [3]. This ensures an optimal coherence, even in case of very large baselines and in the presence of steep topography. In addition to spectral filtering, the interferogram is filtered in time-domain by a low-pass filter in azimuth, which compensates for the different ground resolution in range (~20m) and azimuth (~4.5m).

During processing, several versions of the interferometric phase are generated: The direct one, containing flat-earth, topography and deformation, the topographic phase after removal of the phase component due to the earth's ellipsoid, and the differential phase after correcting for ellipsoid and topography. For topography compensation, again the backward-geocoded DEM derived from the SRTM data is used. Additionally to the phase images, a coherence map is calculated from the filtered topography corrected images.

2.4 Output

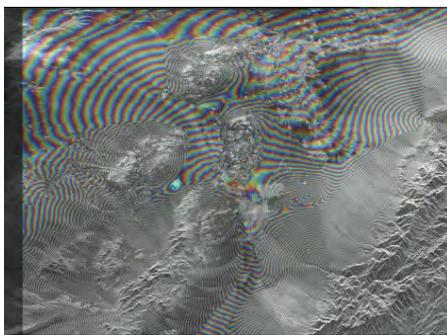
After finishing the data processing, I.D.I.O.T. generates several images with reduced resolution in png format for direct control of the output and/or inclusion in presentations:

<i>filename</i>	<i>description</i>
amplitude_master.png	amplitude master
amplitude_slave.png	amplitude slave
amplitude_rgb.png	RGB composite (amplitude master, amplitude slave, mean amplitude)
coherence.png	interferometric coherence
amplitude_coherence.png	CMY composite (amplitude master, amplitude slave, coherence)
phase.png	interferometric phase
phase_flat.png	interferometric phase ellipsoid corrected
phase_dinsar.png	differential (DInSAR) phase
amplitude_dinsar.png	overlay mean amplitude with differential phase
amplitude_phase.png	overlay mean amplitude with interferometric phase ellipsoid corrected
amplitude_topography.png	overlay mean amplitude with topography
coherence_dinsar.png	differential (DInSAR) phase darkened by coherence values

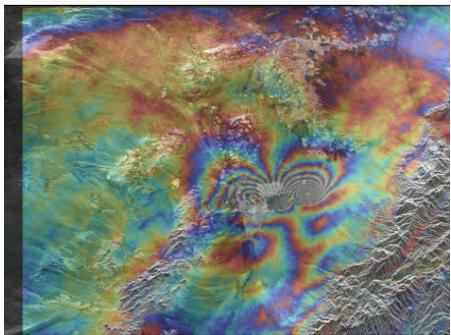
For the moment, I.D.I.O.T. does not perform phase unwrapping, i.e. the derived deformation maps are mainly thought for visual interpretation. Geocoding is also not performed; all output images are in the slant-range geometry of the master image.

3 Experimental Results / Examples

I.D.I.O.T. in its current form has been tested with several ENVISAT data sets. The first test-site is the region of Bam (Iran), where a major earthquake occurred on December 26th 2003. The two investigated image pairs (descending & ascending) have relatively large baselines of around 500 metres. Nevertheless, I.D.I.O.T. was capable of producing highly-coherent fringe patterns. The deformation pattern of the earthquake is clearly visible in the overlay of mean amplitude with the differential phase (see prior page) and of comparable quality than results found in literature and which used an image pair with a much smaller baseline.



Earthquake in the Bam (Iran) region: Overlay of image amplitude and interferometric phase (baseline: 587.7m, time difference = 35 days)



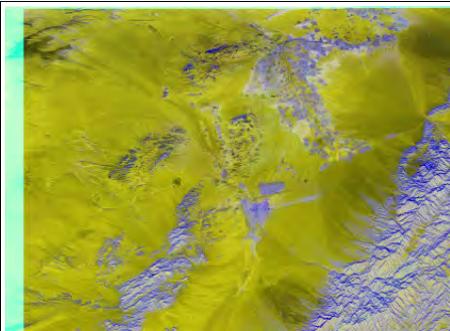
Earthquake in the Bam (Iran) region: Overlay of image amplitude and deformation pattern (baseline: 587.7m, time difference = 35 days)



Tien-Shan mountains (Kyrgyzstan): Overlay of image amplitude and topography



Interseismic pair of the Bam (Iran) region: Long-term interferometric coherence (baseline: 498.2m, time difference = 175 days)



Earthquake in the Bam (Iran) region: CMY composite of image amplitudes and coherence (baseline: 587.7m, time difference = 35 days)



Tien-Shan mountains (Kyrgyzstan): RGB colour composite (image1 / image2 / mean amplitude)

The second test-site is located in Kyrgyzstan and shows parts of the Tien-Shan mountain range with topographic heights up to 7000m. In the figures above two examples of I.D.I.O.T.-generated results are shown: First the overlay of image amplitude with the DEM topography, and secondly a RGB colour composite of the two image amplitudes. Again, the high processing quality and co-registration accuracy generates meaningful and easy-to-interpret results. Interferometric results of this test-site are not shown here.

4 Availability / Terms of Use

I.D.I.O.T. represents a subset of the internal InSAR software developed at the Berlin University of Technology, which will soon be released as free software. It has certain limitation compared to commercial InSAR packages: As mentioned above, the free version accepts only ENVISAT-IMS data as input and generates only output in png format. Geocoding and phase unwrapping are missing. Additionally, I.D.I.O.T. runs only on UNIX platforms (Linux, Mac OS X, UNIX). Further functionality will probably be provided in a commercial version.

I.D.I.O.T. has been entirely programmed in IDL (interactive data language) and will be distributed in a pre-compiled version (sav-file). To run it, the freely available IDL virtual machine is necessary. I.D.I.O.T. will be provided free-of-charge via the internet (<http://www.cv.tu-berlin.de/idiot>). Its usage is completely free for non-commercial and educational purposes. Detailed license regulation will be available when I.D.I.O.T. is released.

5 Conclusions

With I.D.I.O.T. for the first time a free and easy-to-use DInSAR tool becomes available, which requires almost no knowledge about InSAR. It is fully automatic and needs the user only to select the correct input files. I.D.I.O.T. achieves very high coherence even in case of non-optimal baseline constellations and delivers highly accurate interferometric results. As a result, I.D.I.O.T. might be the ideal tool for everybody interested in DInSAR deformation maps, but uninterested in the technical details of SAR interferometry and not willing to purchase expensive software for just a few trials.

I.D.I.O.T. has also several disadvantages. First of all, it is relatively slow, which is a result of a very precise handling of the data. Depending on the image size, typical processing times are about 2h on a 2GHz PC. Due to its fully automatic nature, I.D.I.O.T. is also very inflexible. The generated output images are of good quality, but the way I.D.I.O.T. is preparing them is fixed and there is no way of influencing the processing. Finally, I.D.I.O.T. in its current form is specific for ENVISAT and not supporting any other sensor.

6 Bibliography

- [1] R. BAMLER & P. HARTL: "Synthetic aperture radar interferometry", *Inverse Problems*, Vol. 14, R1-R54, 1998.
- [2] G. FORNARO, M. MANUNTA, F. SERAFINO, P. BERARDINO & E. SANSOSTI: "Advances in multipass SAR image registration", *Proceedings of IGARSS'05*, Seoul, South-Korea, 2005
- [3] A. REIGBER: "Range Dependent Spectral Filtering to Minimize the Baseline Decorrelation in Airborne SAR Interferometry", *Proceeding of IGARSS'99*, Hamburg, Germany, pp. 1721-1723, 1999

Komplexes modulares System zur Ableitung von Umweltparametern

Lutz Bannehr¹, Dirk Hannusch², Sven Jany³ & Heinz Runne⁴

Zusammenfassung: Im Rahmen des FuE-Vorhabens Aero-Komplex-Monitoring (AKM), gefördert durch INNOWATT, wurde in Kooperation zwischen der Milan Flug-GmbH und der Hochschule Anhalt, Institut für Geoinformation und Vermessung, ein modulares Umwelt-Datenerfassungssystem aufgebaut, was einen Airborne-Laser-Scanner, ein digital-photooptisches System, ein hyperspektrales abbildendes Spektrometer, eine Thermalkamera und ein INS/GPS auf einer gemeinsamen Plattform vereint. Das System kann auf einem Kleinflugzeug wie einer Cessna 207 oder einem Hubschrauber betrieben werden und dient der Ableitung von Umweltparametern bzw. dem Umweltmonitoring.

1 Einleitung

Der verstärkte Eingriff des Menschen in die Natur erfordert zunehmend mehr die Ableitung von Umweltparametern, um die Prozesse der Natur zu verstehen, irreversible Schädigungen im Vorfeld zu erkennen und zu vermeiden. Die Erfassung der Umweltparameter muss ferner großflächig kostengünstig sein, damit eine verstärkte Akzeptanz stattfindet.

Es bieten sich Verfahren der Fernerkundung und Photogrammetrie an, da diese großflächige Erfassungen ohne aufwendige In-Situ-Messungen ermöglichen. Eine technisch-wissenschaftliche Lösung in Verbindung mit der Fernerkundung und der Photogrammetrie führt zur Ausschöpfung unterschiedlicher Verfahrenspotenziale bei gleichzeitiger Steigerung der Effizienz. Des Weiteren wird durch den Einsatz modularer flugzeuggetragener Systeme eine flexible Anpassung an unterschiedliche Aufgabenstellungen ermöglicht. Hinzu kommt, dass Module durch Weiterentwicklungen der Hersteller kurzfristig ausgetauscht werden können.

Eine Kombination aus Airborne Laserscanning gekoppelt mit hyperspektralen Daten, Thermaldaten als auch digitalen RGB-Bilddaten, stellen die Basis für die Ableitung von Informationen hinsichtlich der wasserwirtschaftlichen, land- und forstwirtschaftlichen sowie städtebaulichen Maßnahmen bzw. zur Wiederherstellung von Lebensräumen dar.

Durch die Ausschöpfung von Synergieeffekten zwischen unterschiedlich arbeitenden Systemen (Airborne-Laser-Scanner, Thermal, hyperspektral) lassen sich erhebliche Steigerungen der Effizienz in vielen Anwendungsgebieten erschließen. Zum Beispiel erleichtert die Kombination von Laserscannerdaten mit digitalen Bilddaten die Georeferenzierung von Laserscannerdaten. Ferner dient die genannte Gerätekonstellation als Grundlage für die Erstellung von digitalen Orthophotos, die wiederum als Planungsgrundlage vieler Bereiche dient. Die Flutkatastrophen der letzten Jahre haben gezeigt, dass genaue

¹ Prof. Dr. Lutz Bannehr, Inst. f. Geoinformation und Vermessung, Hochschule Anhalt, Bauhausstr. 8, 06846 Dessau, bannehr@afg.hs-anhalt.de

² Dirk Hannusch, Milan Flug GmbH, Schäfereistr. 24, 03139 Spremberg, d.hannusch@milan-flug.de

³ Sven Jany, Milan Flug GmbH, Schäfereistr. 24, 03139 Spremberg, s.jany@milan-flug.de

⁴ Prof. Dr. Heinz Runne, Inst. f. Geoinformation und Vermessung, Hochschule Anhalt, Bauhausstr. 8, 06846 Dessau, runne@afg.hs-anhalt.de

Höheninformationen mittels Airborne-Laser-Scanner als Basis für eine genaue Flutmodellierung unabdingbar sind.

1.1 Zielstellung

Der innovative Kern des Vorhabens liegt in der Optimierung der unterschiedlichen Messverfahren des komplexen Umwelt-Erfassungssystems für eine gemeinsame Datenaufnahme in einem Kleinflugzeug (z.B. Cessna 207) und eine zeitnahe Bereitstellung der Daten. Es soll die Möglichkeit zur effizienten Datengewinnung mit nur einer Befliegung geschaffen werden.

Im Einzelnen wurden mit dem FuE-Vorhaben nachfolgend dargestellte Ziele angestrebt:

- Entwicklung eines abgestimmten modularen Systems aus Kombination von Airborne-Laser-Scanner (ALS), abbildendem Spektrometer, Thermalkamera und digitale Messbildkamera
- Geringes Gewicht und Volumen zur Gewährleistung der Flugfähigkeit in Kleinflugzeugen und Helikoptern.
- Modularer Aufbau des Messsystems, um mit minimalem Aufwand unterschiedliche Aufgaben realisieren zu können.
- Direkte Kopplung von Navigationssystem/Orientierungssystem mit dem Messsystem für eine synchrone Georeferenzierung
- Schnelle Bereitstellung von aufbereiteten Messergebnissen u.a. für Betriebs- und Sicherheitskontrolle.

2 Systemkomponenten

Sowohl der Airborne-Laser-Scanner, die digitale RGB-Messkamera als auch die anderen Hightech-Komponenten stellen unterschiedliche Anforderungen bei einem luftgestützten Einsatz. Eine grundsätzliche, allen Aufgabenstellungen gemeinsame Teilaufgabe der Datenauswertung ist die Georeferenzierung, welche den Bezug zwischen Messungen im Bildraum und einem übergeordneten Referenzsystem herstellt. Oftmals wird vom Anwender eine Unsicherheit besser als 1 m gefordert. Um diesen hohen Anforderungen zu genügen wurde für die Georeferenzierung ein GPS/INS-System – AEROcontrol System von IGI – integriert. Unter Nutzung von ergänzenden GPS-Korrektursignalen ist theoretisch eine Ortsgenauigkeit von ca. 0.1 – 0.15 m erreichbar.

Voraussetzung für die Ausnutzung des Genauigkeitspotenzials des Systems ist die Integration der Einzelmodule auf einer gemeinsamen Trägerplattform sowie die Zeitsynchronisation der Einzelkomponenten. Durch den modularen Aufbau des Systems (Abb.1) lässt sich das System an unterschiedliche Aufgabenstellungen zur Erfassung von Umweltparametern anpassen.

Der Datenstrom des Gesamtsystems, angefangen von der Datenaufzeichnung bis hin zu den Datenprodukten ist in Abbildung 1 anschaulich dargestellt.

Das luftgestützte Erfassungssystem ist für Flughöhen zwischen 200-1.500 m über Grund konzipiert.

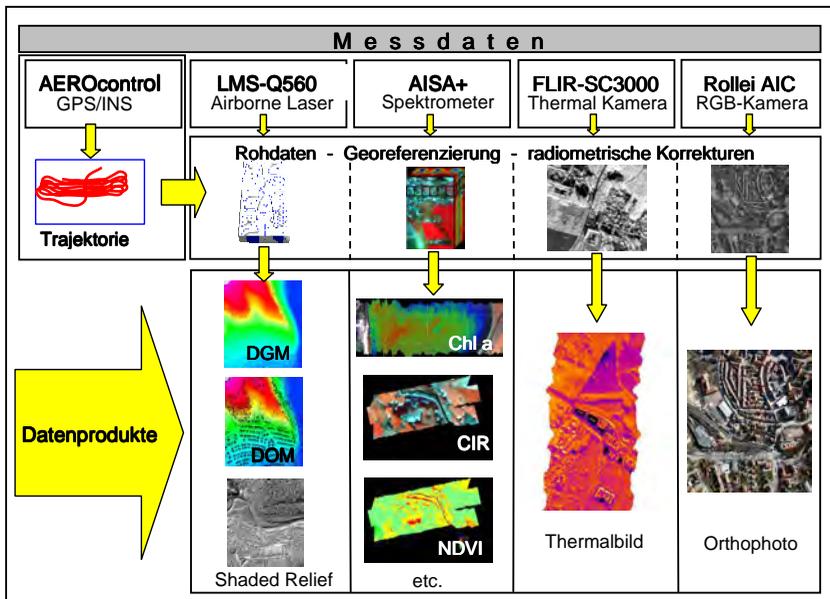


Abb.1: Schematische Darstellung der Komponenten des modularen Systems und Beispiele für ableitbare Produkte.

Im Folgenden werden die Einzelmodule des Systems näher beschrieben.

2.1 Airborne-Laser-Scanner

Der eingesetzte Airborne-Laser-Scanner ist vom Typ Riegler LMS-Q560. Airborne-Laser-Scanner (ALS) dienen zur Generierung von digitalen Höhenmodellen (DOM). Beim ALS werden in regelmäßigen Abständen Laserimpulse ausgesendet, welche vom Erdboden und den darauf befindlichen Objekten reflektiert werden. Durch Laufzeitmessung wird die Entfernung zwischen dem Laser und der Geländeoberfläche bestimmt. Aus den Echos von First- und Last-Puls lassen sich aufgrund der hohen Durchdringungsfähigkeit des Airborne-Laser-Scanners in Vegetationsbereiche ein Oberflächenmodell (DOM) mit Vegetation und Bebauung und ein Geländemodell (DGM) ohne Vegetation und Bebauung ableiten. Die Modelle sind Planungsgrundlage im Bergbau, in der Wasserwirtschaft, im Straßen- und Städtebau und in vielen anderen Bereichen.

Die Differenz von DOM und DGM liefert z.B. wertvolle Daten über die Vegetationshöhe. In Verbindung mit dem hyperspektralen Sensor ergeben sich flächendeckend Informationen über den Zustand der Vegetation, wie es mit herkömmlichen Systemen bisher nicht möglich war. Bei einer durchschnittlichen Messfluggeschwindigkeit von 50 m/s ergeben sich aus 600 m Flughöhe über Grund eine räumliche Auflösung von ca. 30 cm (Messfleck am Boden bei 0,5 mrad). Die Höhenauflösung liegt bei etwa 1 cm. Die digitalen Geländedaten dienen neben den oben aufgeführten Bereichen noch für die differenzielle Entzerrung der digitalen RGB-Messkamera, dem abbildenden Spektrometer und der Thermalkamera.

2.2 Digitale RGB-Messkamera

Die im System integrierte digitale RGB Kamera Rollei AIC Modular LS wurde speziell für Luftbild – und industrielle Anwendungen konzipiert. Über eine RS232-Schnittstelle erfolgt die Fernsteuerung der Kamera. Die Daten können mit einer Bildrate von ca. 0.25 Hz über eine IEEE 1394-Schnittstelle auf ein Barebone Raid System gespeichert werden. Mit 16 Mio Pixel erreicht sie mit einem 50 mm Objektiv bei einer Flughöhe von 600 m eine räumliche Auflösung von 0.1 x 0.1 m, was für die meisten Anwendungen bei der Erfassung von Umweltparametern als völlig ausreichend gilt.

Die folgende Tabelle gibt Aufschluss über weitere Details der beiden Systeme.

Tab. 1: Spezifikationen vom Laser Scanner und der digitalen RGB-Messkamera.

LMS-Q560 Airborne Laser Scanner		Rollei AIC modular LS Kamera	
Messbereich	≥ 1500 m	Kameratyp	Digitalkamera
Laserpuls Rate	bis 100 000 Hz	Auflösung	16 Mpixel
Laser Wellenlänge	nahes Infrarot	Bildformat	36 mm x 36 mm
Laserstrahldivergenz	0.5 mrad	Verschlusstyp	Zentralverschluss
Scannersteuerung	rot. Polygonspiegel	Verschlusszeiten	30s – 1/1000 s
Scanabtastung	parallele Linien	Brennweiten	40 – 150 mm
Scanwinkel	± 22.5°	Fernsteuerung	RS232
Ausgang	Ethernet TCP/IP	Bildrate	ca. 0.25 Hz
Gewicht	20 kg	Gewicht (mit Computer)	5 kg
Leistung	120 Watt	Leistung (mit Computer)	250 Watt

2.3 Hyperspektrales abbildendes Spektrometer

Hyperspektrale abbildende Spektrometer werden u. a. zur Bestimmung von Wasserinhaltsstoffen von Seen und Flüssen (HEEGE & FISCHER, 2004), (FRAUENDORF et. al., 2002), Vegetationszustandsüberprüfung und der Atmosphärenforschung (ARMBUSTER et. al., 2001), also zum Umweltmonitoring und Detektion von Umweltschäden, eingesetzt. Das im System verwendete hyperspektrale abbildende Spektrometer AISA+ liefert je nach Programmierung bis zu 244 spektrale Kanäle mit einer Bandbreite von 2.9 nm. Bei einer Flughöhe von 500 m können räumliche Informationen über die Erdoberfläche mit einer Pixelgröße von 0.7 x 0.7m erfasst werden. Für viele Anwendungen sind für die Ableitung verschiedener Umweltparameter wesentlich weniger als 244 spektrale Kanäle ausreichend. Diese können voreingestellt werden und unterschiedliche Bandbreiten aufweisen, sofern sie sich nicht überlappen.

2.4 Thermalkamera

Die im System integrierte Thermalkamera FLIIR SC300 erlaubt es, bildhaft Temperaturstrukturen aufzuzeichnen. Sie ist im infraroten Spektralbereich zwischen 8 und 9 µm empfindlich. Für schnell bewegte Objekte kann man bis zu 50 Bilder pro Sekunde aufnehmen. Anwendungsbereiche sind die Erfassung von thermischen Unterschieden mit einer Auflösung von bis zu 20 mK von z.B. Mülldeponien, Klemmverbindungen von Hochspannungsleitungen, Pipelines, Temperaturverteilung von Gewässern. Oftmals weisen selbst schon kleine Temperaturunterschiede auf eine Änderung im Ökosystem hin, die mit anderen Messsystemen schlecht oder nicht erkannt werden.

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Spezifikationen des abbildenden Spektrometers und der Infrarot-Kamera angegeben.

Tab. 2: Spezifikationen des hyperspektralen abbildenden Spektrometers und der Thermalkamera.

Aisa+ abbildendes Spektrometer		FLIR SC3000 Infrarot-Kamera	
Spektraler Bereich	400 -970 nm	Spektrale Empfindlichkeit	8 -9 μm
Spektrale Kanäle	< 244	Geometrische Auflösung	1.1 mrad
Spektrale Auflösung	2.9 nm	Detektor	GaAs Qwip 320 x 240 Pix
Räumliche Pixel	500	Temperaturauflösung	0.02 °C
Öffnungswinkel	39.7°	Messbereiche	-20 - +80°C, -1500°C
Boden Auflösung	0.71 m (500m Höhe)	Absolute Genauigkeit	$\pm 1^\circ\text{C}$ <150°C
Kamera	Scan CCD	Aufzeichnungsrate	bis 50 Hz
Ausgang	12 bit	Stirlingkühlung	-203 °C
Gewicht	30 kg	Gewicht	13 kg
Leistung	300 Watt	Leistung	210 Watt

2.5 Navigations- und Positionserfassungssystem

Das AEROcontrol System dient zur Erfassung der Positions- und Lageerfassung des Flugzeugs für eine spätere Georeferenzierung der unterschiedlichen Messwerte der Module des Systems. Es besteht aus einem Fiberoptik Kreisel als Kernstück. Integriert ist ferner ein 12 Kanal L1/L2 GPS Empfänger sowie ein Computer für die Erfassung der Daten. Die angegebenen Unsicherheiten in der Postprozessierung liegen für die Position <0,1 m RMS, für die Höhe <0.15 m RMS, Φ/Ω 0.004° RMS und für κ 0.01° RMS.

2.6 Steuerrechner und Zeitsynchronisation

Um das Gesamtsystem modular einsetzen zu können, hat es sich als sinnvoll erwiesen, für jedes Modul ein unabhängiges Datenerfassungssystem zu nutzen. Damit während der Datenaufnahme die Synchronisation für die spätere Georeferenzierung gewährleistet ist, erfolgt eine gemeinsame Triggerung der Einzelkomponenten. Als Steuersystem wurde hierfür ein Computersystem mit mehreren Schnittstellen angepasst. Während der Messungen werden kontinuierlich über den Steuerrechner „Zeitstempel“ zur Synchronisation den Einzelsystemen gesendet und zwar durch Nutzung des PPS-Signals (Pulse Per Second) des GPS-Empfängers. Das PPS-Signal steuert gewöhnlich ein „eigenes“ Synchronisations-Zeitglied der Sensorhardware bzw. der Datenerfassungssoftware. Über eine weitere Schnittstelle wird zu jedem PPS-Signal die zugehörige GPS-Wochensekunde ausgegeben. Diesen synchronisierten Zeiten können nun die hochgenauen, hochaufgelösten Orientierungsdaten des GPS/INS-Systems (64, 128 oder 256 Hz) den Einzelmodulen zugeordnet werden, so dass für jede einzelne Messung eine 3-d-Koordinate mit den drei Orientierungswinkeln (Ω , Φ , κ) zur Georeferenzierung zur Verfügung steht. Die folgende Abbildung 2 zeigt schematisch den Datenstrom des Systems.

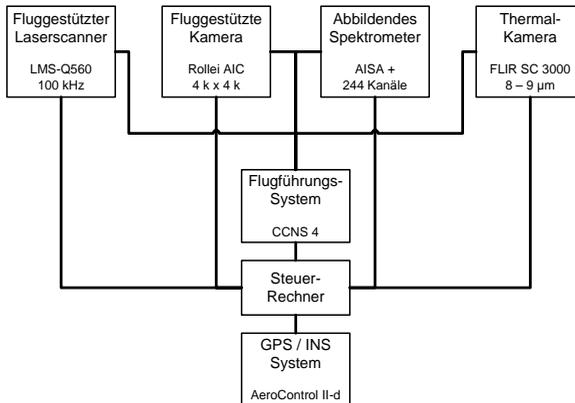


Abb. 2 : Schematische Darstellung des Datenstromes des modularen Systems.

3 Messdurchführung

Das System wird in der Regel mit einem Piloten und einem Operator während der Flugkampagnen betrieben. In den Fällen, wo alle Module gleichzeitig im Einsatz sind, ist ein zweiter Operator für die Bedienung notwendig.

Im Folgenden sollen Beispiele für den Einsatz des Systems aus der Problematik des gefluteten Tagebaus präsentiert werden.

3.1 Anwendungsbeispiele

Neben der Erfassung des Zustandes der Vegetation lassen sich aus spektralen Charakteristiken Chlorophyll-a, Gelbstoff, Sichttiefe und Tripton ableiten. Da es einen funktionalen Zusammenhang zwischen Gelbstoff und anderen Größen gibt, können noch die Eisenionenkonzentration, DOC-Konzentration, pH-Wert und die Azidität abgeleitet werden. Es existiert eine Reihe von Auswertelgorithmen für die Bestimmung von Wasserinhaltsstoffen aus Flugzeug- und Satellitenfernerkundungsdaten für natürliche Binnengewässer (HEEGE 2000). Systematische Untersuchungen von sauren Gewässern mit pH-Werten bis < 3. in der Region der Lausitz wurden von FRAUENDORF (2002) und FRAUENDORF & GLÄBER (2002) durchgeführt. Die abgeleiteten Algorithmen dienen hier als Grundlage für die Berechnung der genannten Wasserinhaltsstoffe.

Der Partwitzer See sowie der Sabrodter See in der Lausitz wurden am 04.07.2005 mit dem modularen System befliegen. Gleichzeitig wurden zum Zeitpunkt des Überflugs In-Situ-Messungen der Wasserinhaltsstoffe von einem Boot aus vorgenommen. Die hier präsentierten Ergebnisse zeigen die Problematik der Versauerung mit extrem niedrigen pH-Wert und dessen flächenmäßige Verteilung in Abb. 3. In Ergänzung hierzu sind noch der Chlorophyll-a (Abb. 4) und die flächenmäßige Darstellung der Temperaturverteilung des Sabrodter Sees (Abb. 5) zu sehen.

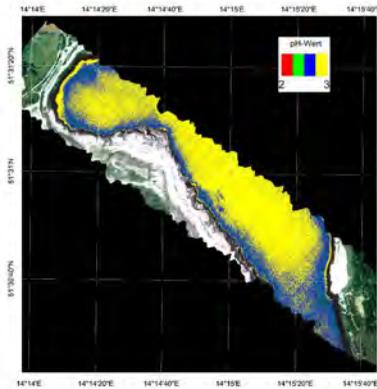


Abb. 3: Darstellung der flächenmäßigen pH-Wert-Verteilung für den Sabroter See Brandenburg. Die Schwankungsbreite liegt hier nur zwischen pH-Werten von 2-3 und wird von den In-Situ-Messungen gestützt.

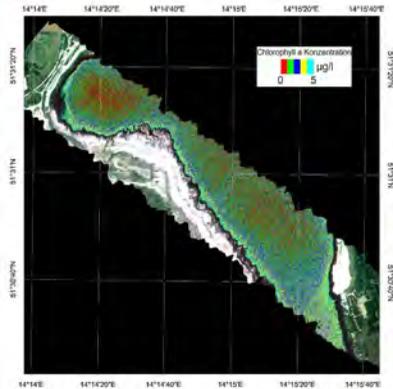


Abb. 4: Verteilung vom Chlorophyll-a, ein Pigment was in allen Algenklassen vorkommt.

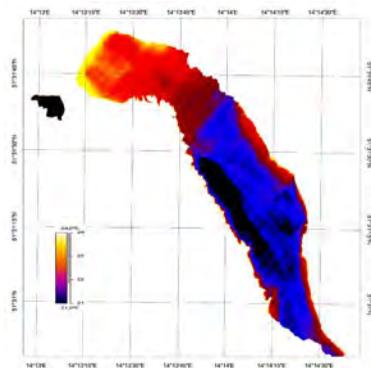


Abb. 5: Beispiel der abgeleiteten Temperaturverteilung des Sabroter Sees. Die Daten wurden atmosphärenkorrigiert.



Abb. 6: Aus den Daten der digitalen RGB-Messkamera generiertes Orthophoto für den Partzitzer See, Brandenburg.

5 Zusammenfassung

Es wurde ein modulares System zum Umweltmonitoring bzw. der Ableitung von Umweltparametern vorgestellt. Die vier Module mit einem Gesamtgewicht von 68 kg und einem Leistungsverbrauch von ca. 880 Watt können einzeln aber auch in Kombination auf einem Kleinflugzeug oder Helikopter betrieben werden.

Die Beispiele zeigen die Integration verschiedener komplexer Einzelsysteme zu einem Gesamtsystem und das Potenzial für den ständig steigenden Bedarf am Umweltmonitoring.

Standardprodukte wie digitale Oberflächenmodelle, digitale Geländemodelle, Orthophotos, aber auch abgeleitete Produkte des hyperspektralen Sensors wie Vegetationsindex (NDVI), CIR, Wasserinhaltsstoffe können zeitnah abgeleitet werden.

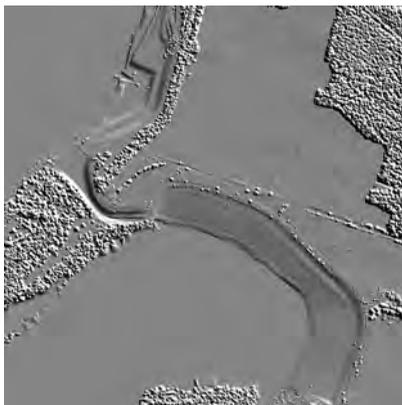


Abb. 7: Schummerdarstellung des digitalen Oberflächenmodells (DOM) für den Partwitzer See, Brandenburg.



Abb. 8: Schummerdarstellung des digitalen Geländemodells (DGM) für den Partwitzer See, Brandenburg.

Literaturangaben

- ARMBRUSTER, W., ASSENG, H., BANNEHR, L. & FISCHER, J. 2001: Satelliten-gestützte Fernerkundung von Aerosolparametern; Abschlußbericht Förderkennzeichen 07AF305/9
- FRAUENDORF, J., GLÄBER, C., OLBERT, C. & FISCHER, J., 2002: Hyperspektrales Monitoring von Tagebaurestseen mit innovativen Methoden, In: BLASCHE, T. [HRSG.] : Fernerkundung und GIS, Neue Sensoren- innovative Methoden, Wichmann Verlag, pp 55-64
- HEEGE, T. & FISCHER, J., (2004), Mapping of water constituents in Lake Constance using multispectral airborne scanner data and a physically based processing scheme. Canadian Journal of Remote Sensing CJRS, Vol. 30, No. 1, pp. 77-86
- HEEGE, T., HÄSE, C., BOGNER, A. & PINNEL, N., 2003: Airborne multi-spectral sensing in shallow and deep waters. Backscatter, Vol. 14, No.1, pp. 17 – 19

Dynamische Beugungsmuster als Passpunktfelder für die geometrische Kalibration

MARTIN BAUER¹, ANKO BÖRNER², HERBERT JAHN³, MARTIN SCHEELE⁴, ADRIAN SCHISCHMANOW⁵, REINHARD SCHUSTER⁶

Zusammenfassung: Es wird ein Messverfahren zur Erzeugung dynamischer Beugungsmuster mittels statischer und steuerbarer Lichtmodulatoren vorgestellt. Die Beugungsmuster werden als Passpunktfelder zur Bestimmung der Inneren Orientierung verwendet. Die separate Bestimmung der Parameter der Inneren Orientierung setzt eine präzise Ausrichtung der Komponenten im Messaufbau voraus. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Ausrichtung der optischen Achse zur Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls und zur Lage der Lichtmodulatoren. Der experimentelle Aufbau sowie die Methoden zur Justage der einzelnen Komponenten werden vorgestellt. Die Passpunktfelder können mit geringem Aufwand an das Bildfeld des jeweiligen Sensors angepasst werden. Das ermöglicht eine sehr flexible und optimale Abdeckung der Bildebene mit Passpunkten und stellt eine gute Ausgangssituation für die nachfolgende geometrische Kamerakalibration dar. Die dabei gewonnenen Ergebnisse werden präsentiert.

1 Einleitung

Abbildende optische Systeme, speziell Kameras, können in der Photogrammetrie eingesetzt werden, wenn sie geometrisch kalibriert sind. Ein gängiges und verbreitetes Verfahren der geometrischen Kalibration nutzt Testfelder, die zueinander genau vermessenen Passpunkte enthalten. Im Projekt bbFoKal (SCHEELE, JAHN, SCHUSTER, 2004) konnte nachgewiesen werden, dass Beugungsbilder, speziell die der Fraunhoferschen Beugung, solchen Testfeldern äquivalent sind. Die Verwendung diffraktiver optischer Elemente (DOE), die einen aufgeweiteten Laserstrahl beugen, liefert Beugungsbilder, die für die geometrische Kalibration verwendet werden können. In dieser Arbeit wird darüber berichtet, welche neuen Möglichkeiten sich mit dem Einsatz steuerbarer diffraktiver optischer Elemente, auch Spatial Light Modulators (SLM) genannt, in diesem Zusammenhang ergeben. Die Hauptkomponenten eines solchen dynamischen Lichtmodulators sind ein Flüssigkristalldisplay, eine Steuerelektronik, eine spezielle Grafikkarte und eine Steuerungssoftware. Jedes Flüssigkristallelement, das eine Ausdehnung in der Größe von 0.009 mm hat, ist separat durch eine acht Bit Phasenmodulation adressierbar. Es können Beugungsstrukturen mit 255 Grauwertabstufungen erzeugt werden. Der maximale Beugungswinkel beträgt drei Grad. Der Versuchsaufbau ist so gestaltet, dass die Parameter der Inneren Orientierung, wie Kammerkonstante, Hauptpunkt und Verzeichnung, allein bestimmt werden können. Der für diese Arbeit eingesetzte SLM besteht aus 1900 x 1200 Flüssigkristallelementen, Abb.1. In Abb. 2 wird das Prinzip der Generierung von Beugungsmustern dargestellt.

¹Martin Bauer, TFH-Wildau, Bahnhofstraße, 15745 Wildau, E-Mail: m.bauer@dlr.de

²Dr. Anko Börner, ³Prof. Herbert Jahn, ⁴Dr. Martin Scheele, ⁵Dr. Adrian Schischmanow,

⁶Dr. Reinhard Schuster, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Einrichtung optische Informationssysteme, Rutherfordstraße 2, D- 12489 Berlin, e-mail: adrian.schischmanow@dlr.de



Abb. 1: Spatial Light Modulator mit Steuereinheit, beugende Substruktur nach BESSY-AZM. Daniel Schondelmaier

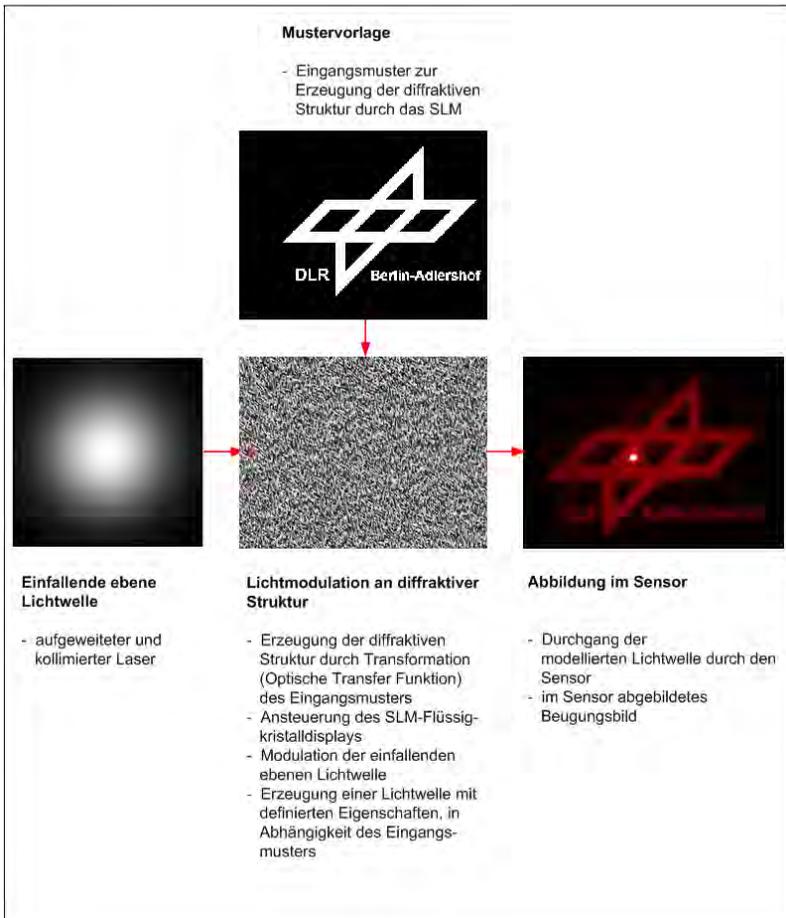


Abb. 2: schematische Darstellung der wahlweisen Erzeugung von Beugungsmustern

2 Versuchsaufbau

Der experimentelle Aufbau ist schematisch in Abb. 3 dargestellt. Der Lichtstrahl eines He-Ne-Lasers (633 nm) wird entsprechend der Apertur der zu kalibrierenden Kamera aufgeweitet und mit einer Kollimatoroptik zu einem parallelen Strahlenbündel geformt. Die vom Kollimator erzeugte ebene Welle trifft auf einen Strahlteiler und wird aufgespalten. 50% des Strahlungsanteils der auftreffenden Lichtwelle werden reflektiert und 50% transmittiert. Der vom Strahlteiler reflektierte Lichtanteil wird am SLM entsprechend der gewünschten Intensitätsverteilung der Welle gebeugt. Durch die Lichtmodulation entstehen Lichtbündel mit definierten und hochgenau bekannten Beugungswinkeln, die wiederum auf den Strahlteiler gelenkt werden.

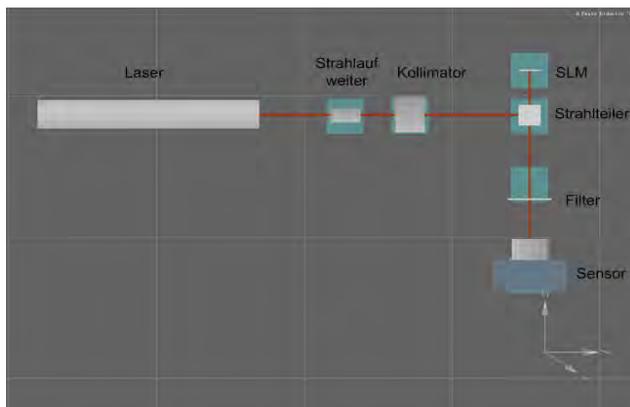


Abb. 3: Schematischer Versuchsaufbau

Die gebeugte Welle trifft nach ihrem Durchgang durch den Strahlteiler auf die Eingangsoptik des zu kalibrierenden Sensorsystems. Auf der Fokalebene des Sensors entsteht dann das gewünschte Beugungsbild, das entsprechend gespeichert wird.

3 Bestimmung der optischen Achse

Um die Parameter der Inneren Orientierung separat zu bestimmen, muss das Kamerakoordinatensystem parallel zum Laborkoordinatensystem orientiert sein. Bis auf eine Drehung um die optische Achse ist diese Bedingung erfüllt, wenn die optische Achse parallel zur Ausbreitungsrichtung des ungebeugten Laserstrahls ausgerichtet ist. Der Durchstoßpunkt der optischen Achse durch die Bild- bzw. Sensorebene, der der Koordinatenursprung (Hauptpunkt) für alle Bildkoordinatensysteme ist, wird durch den Ort des fokussierten Laserstrahls in der Bildebene fixiert. In (JAHN, SCHEELE, SCHUSTER, 2004) wurde erläutert, wie mittels symmetrischer Beugungsbilder der Hauptpunkt gefunden werden kann. Im Vorfeld dieser Arbeit wurden experimentelle Untersuchungen und beugungstheoretische Rechnungen durchgeführt.

Deren übereinstimmendes Ergebnis war, dass hinreichend kleine Divergenzwinkel zwischen optischer Achse und Laserausbreitungsrichtung zu einer behebbaren Unsymmetrie des

Beugungsbildes führt. Durch eine Translation $T = f \otimes \gamma$, senkrecht zur optischen Achse, kann die Symmetrie des speziellen Beugungsbildes wiederhergestellt werden. Hierbei ist f die Brennweite und γ der Divergenzwinkel zwischen optischer Achse und Laserausbreitungsrichtung. Das bedeutet mit anderen Worten, die geometrische Kalibration ist in bestimmten Grenzen unabhängig vom Disalignment der optischen Achse zur Laserstrahlrichtung. Diese Näherung der starren Translation für das gesamte Beugungsbild gilt mit einem Fehler kleiner einem Pixel unter der Bedingung: $\gamma \leq 0.8^\circ$. Während die Lage des Hauptpunktes dabei im Bereich einiger Pixel unbestimmt bleibt, bleiben solche Kalibrationsparameter, wie die Verzeichnung davon unbeeinflusst. Für eine genauere Fixierung des Hauptpunktes bietet sich eine Methode an, die die Symmetrie der Newtonschen Ringe, entstanden bei der Reflektion des aufgeweiteten Laserstrahls am Objektiv, ausnutzt. Nur wenn der Strahl in sich reflektiert wird, entstehen durch Interferenz kreisförmige Ringe. In Abb. 4 ist in einer Abfolge von Bildern der Übergang vom Divergenzwinkel zwischen optischer Achse und Laserausbreitungsrichtung von 1.5° bis 0° dargestellt. Der zum dritten Teilbild gehörende Lichtfleck in der Bildebene fixiert, bei den in den Experimenten eingesetzten Kameras (VGA mit $f = 10$ mm), den Hauptpunkt auf ein bis zwei Pixel genau.

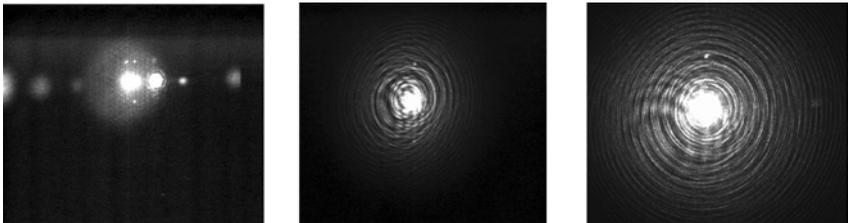


Abb. 4: Ausrichtung der optischen Achse zur Laserstrahlrichtung mittels Newtonscher Ringe. Links und Mitte: dejustierte Kamera, Rechts: justierte Kamera

4 Vermessung des SLM

Als richtungsempfindlicher Sensor dient eine digitale Kamera. Der ungebeugte Laserstrahl bildet in der Bildebene einen Lichtfleck, dessen Mittelpunkt (Schwerpunkt) gespeichert wird. Mittels des SLM wird der Laserstrahl im zweiten Arbeitsschritt in definierte Richtungen gebeugt. Dadurch, dass das SLM goniometrisch im Versuchsaufbau angebracht wurde, kann die Genauigkeit der Beugungswinkel überprüft werden. Dazu wird das SLM um die vom Hersteller des SLM angegebenen Beugungswinkel gedreht. Damit müsste ein gebeugter Laserstrahl den Punkt in der Bildebene treffen, den der ungebeugte Strahl im nicht gedrehten Fall getroffen hat. Die gemessenen Abweichungen lagen im Pixelbereich.

5 Kalibration und Ergebnisse

An dieser Stelle werden die wesentlichen Schritte zur Kalibration und die Ergebnisse im Überblick vorgestellt. Die einzelnen Komponenten können in Bildverarbeitungs- und Kalibrationsschritte untergliedert werden, Abb. 7.

In ersten Versuchen bestand das Beugungsbild aus Punkten, Abb. 5. Im Vergleich dazu zeigte sich, dass ein Beugungsbild aus Kreuzen, Abb. 5, insofern günstiger ist, weil die Schwerpunktbestimmung dieser Kreuze sich genauer realisieren ließ, als das bei Punkten der Fall war. Als Testobjekt für die Kalibration diente eine Kamera vom Typ Olympus E1, mit einem Objektiv der Brennweite $f = 50$ mm. Im ersten Arbeitsschritt wurde die optische Achse zum Laserstrahl (siehe Abschnitt 3) ausgerichtet. Im zweiten Schritt wurden die Bildkoordinaten der Beugungsfiguren automatisch ermittelt. Dazu wurde ein Gauß-Fit-Algorithmus als stabiles Verfahren zur Anwendung gebracht. Es bestimmt die Schwerpunktkoordinaten der einzelnen Beugungsfiguren auf Subpixelgenauigkeit. Danach (Arbeitsschritt 3) wird jede einzelne Beugungsfigur innerhalb einer vorgegebenen Umgebung mit dem Abstand R_1 vom Hauptpunkt, dem entsprechenden vom SLM gebeugten Strahl und seiner idealen Abbildung in der Sensorebene zugeordnet. Dies erfolgt nach der Methode des kleinsten Abstandes zu den bekannten idealen Orten der Beugungsfiguren (z.B. Kreuze). Im vierten Arbeitsschritt erfolgt nach dem in ZHANG (1998) beschriebenen Verfahren eine Korrektur der radialen Verzeichnung aller Beugungsfiguren, auf der Grundlage der im 3. Arbeitsschritt ermittelten Abweichungen der Ortskoordinaten der realen Beugungsfiguren zu den idealen. Mit der Wahl einer neuen Umgebung R_2 mit $R_2 > R_1$ geht man wieder zu dem 3. Arbeitsschritt zurück und verfährt so lange, bis jede Beugungsfigur identifiziert ist. Ein Polynomfit 4. Ordnung lieferte die Transformation vom Originalbild in das kalibrierte Bild.

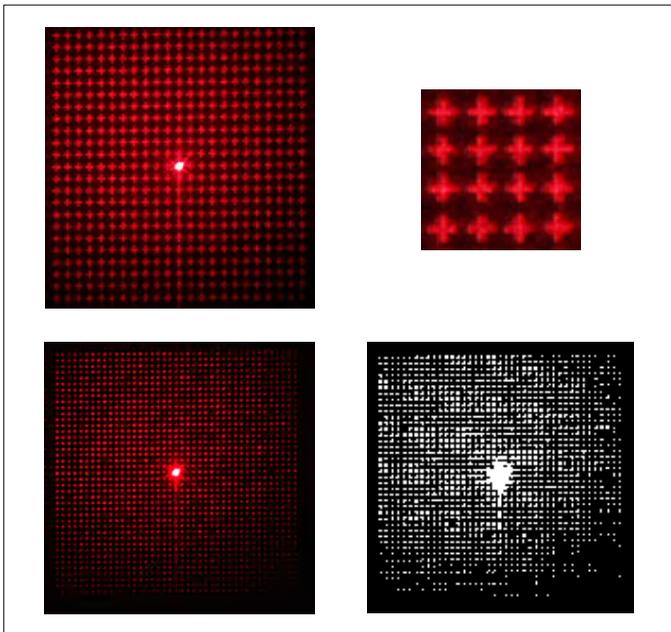


Abb. 5: Unterschiedliche Passpunktdichten und Beugungsfiguren. Links oben: Beugungsbild mit 23 x 23 Passpunkten (Kreuze). Rechts oben: Ausschnittsvergrößerung mit Kreuzen
Links unten: Beugungsbild mit 41 x 41 Passpunkten (Punkte). Rechts unten: Binärbild

Das vorgestellte Messverfahren wurde mit simulierten und realen Daten getestet. Mit dem bereits vorgestellten SLM wurden holographische Passpunktfelder unterschiedlicher Dichte (5×5 bis 31×31 Passpunkte) und verschiedenen Beugungsfiguren (Punkte, Kreuze) erzeugt, Abb. 5, und ausgewertet, Abb. 6. Die Kalibrierungsergebnisse sind in Tab. 1 zusammengefasst. Die Korrektur der Passpunktkoordinaten ergab Abweichungen zum idealen Wert von 0.2-0.4 Pixel (Standardabweichung). Die Anzahl der Passpunkte bzw. die Dichte des Feldes scheint auf das Ergebnis der Korrektur keinen Einfluss zu haben. Da aufgrund der geringen Beugungswinkel nur der paraxiale Bereich des Sensorbildes betrachtet wurde, ist davon auszugehen, dass in dem betrachteten Fall bereits eine geringe Passpunktzahl ausreichend ist, um die Abbildungsfehler hinreichend genau zu korrigieren. Im gesamten Bildfeld sollte die Qualität der Kalibration mit zunehmender Passpunktanzahl jedoch steigen. Das lässt sich jedoch nur durch eine Kopplung statischer mit dynamischen Lichtmodulatoren realisieren. Durch eine Kalibration mit dynamischen Passpunktfeldern wird außerdem eine hohe Datenredundanz erreicht. Dadurch wird der Verlust nicht automatisch identifizierter Passpunkte kompensiert.

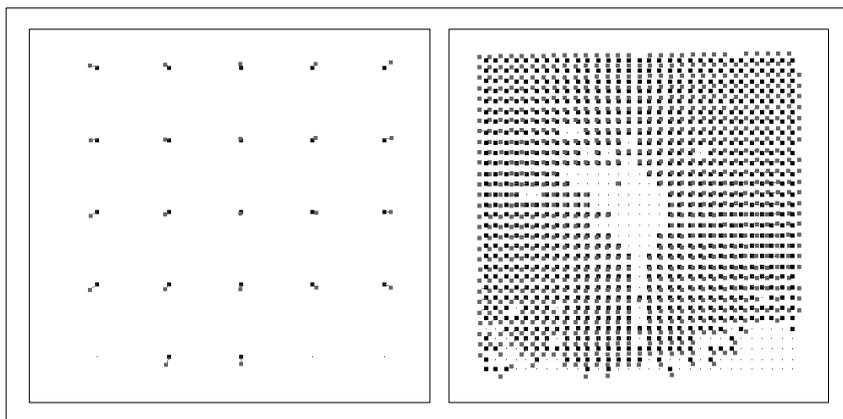


Abb. 6: Zuordnung von extrahierten (hell) und idealen (dunkel) Koordinaten. Links: Passpunktfeld (5×5). Rechts: Passpunktfeld (31×31)

Tab. 1 Kalibrierungsergebnisse

Passpunkt- feld	Passpunkt- anzahl	Passpunktabstand im Beugungsbild Anzahl Pixel	Passpunktdetektion Bildverarbeitung Anzahl Punkte	Punktzuordnung Anzahl Punkte	Korrektur Pixelblickrichtung Standardabweichung vom Idealwert	
					x (Pixel)	y (Pixel)
5×5	25	95	23	21	0.2	0.2
11×11	121	38	121	114	0.4	0.3
23×23	529	18	349	330	0.4	0.4
31×31	961	12	838	560	0.3	0.4

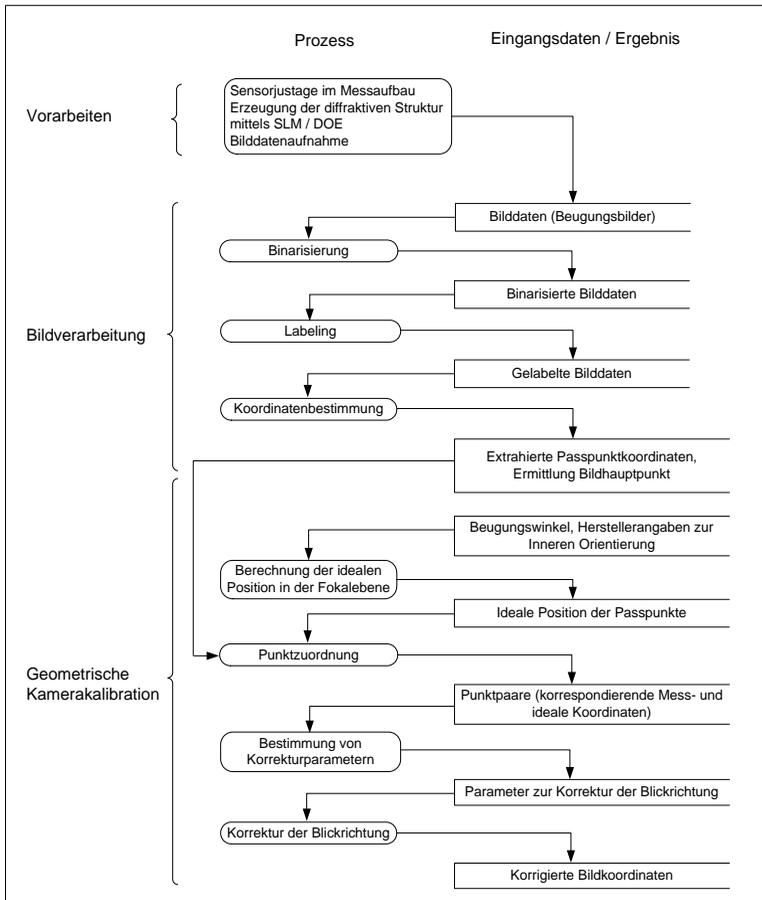


Abb. 7: Ablaufschema zur Kalibration

6 Zusammenfassung

In den ersten Experimenten konnte nachgewiesen werden, dass Spatial Light Modulatoren für die Zwecke der geometrischen Kalibration von Kameras genutzt werden können. Wie auch bei den statischen DOE gelingt es, die Parameter der Inneren Orientierung separat und unabhängig von denen der Äußerer zu bestimmen. Kleine Divergenzwinkel zwischen optischer Achse und Laserstrahl sind einer Translation äquivalent und haben keinen Einfluss auf die Parameter der Inneren Orientierung. Ebenso verhält es sich mit kleinen Drehungen um die optische Achse. Auch sie lassen bis auf einen unbekanntem Offsetwinkel, der zu den Parametern der Äußerer Orientierung geschlagen wird, die Parameter der Inneren Orientierung unbeeinflusst. Es ist sehr wohl denkbar, dass speziell die Entwicklung der Beamertechnik dazu führen wird, dass die Dimension der SLM um einen Faktor zwei bis drei

ansteigen wird. Damit können bei kleineren Mikrostrukturen des SLM größere Beugungswinkel realisiert oder bei gleich großen Mikrostrukturen und Brennweiten größere Bildfelder ausgefüllt werden. Inwiefern eine schnelle Abfolge verschiedener Beugungsbilder die Genauigkeit der Kalibration erhöht, bleibt zukünftigen Arbeiten vorbehalten.

Danksagung

Die hier vorgestellten Arbeiten entstanden im Rahmen des Projektes DIOPTER. Dieses Projekt wurde gefördert aus Mitteln des europäischen Fonds für regionale Entwicklung und der Senatsverwaltung für Wirtschaft, Arbeit und Frauen des Landes Berlin in Zusammenarbeit mit der Firma HoloEye Photonics AG.

7 Literaturverzeichnis

- SCHEELE, M., JAHN, H., SCHUSTER, R.: Geometrische Kalibration von CCD Kameras mittels Beugungsbilder, Publikationen der DGPF, 2004, Band 13, S. 513
- H. JAHN, M. SCHEELE, R. SCHUSTER: Metrische Qualifizierung von Matrix-Kameras, 49. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Ilmenau, 27.- 30. 09 2004, Vol. 2, S. 261
- ZHANG, Z.: A Flexible New Technique for Camera Calibration, Technical Report MSR-TR-98-71, December 2, 1998

Untersuchung von Sensoren zur Lagebestimmung in Picosatellitenplattformen

FRANK BAUMANN, KLAUS BRIESS & HAKAN KAYAL

Zusammenfassung: Picosatelliten bilden eine neue Satellitenklasse, die durch eine Gesamtmasse des Satelliten von weniger als 1 kg gekennzeichnet ist. Für Fernerkundungsaufgaben wird eine drei-Achsen-stabilisierte Plattform mit präziser Lageregelung benötigt. Vorhandene, raumfahrerprobte Sensoren und Aktuatoren der Lageregelung sind aufgrund ihrer Masse, ihres Stromverbrauchs und ihrer Kosten ungeeignet für Picosatellitenplattformen. An der TU Berlin werden kommerzielle Sensoren auf ihre Eignung zur Lagebestimmung in Picosatellitenplattformen untersucht. Das Studentensexperiment TUPEX testete als Nutzlast einer Höhenforschungsrakete Sensoren zur Bestimmung der Drehrate, der Magnetfeldstärke und des Sonnenvektors im körperigen Koordinatensystem. Die untersuchten Sensoren werden vorgestellt und die Ergebnisse des Raketenexperiments ausgewertet.

1 Picosatelliten

In den letzten Jahren wurden große Anstrengungen unternommen, Größe und Masse von Satelliten zu reduzieren. Dabei wurden Satellitenklassen wie Mikro- und Nanosatelliten etabliert, die mit geringeren Kosten entworfen, gebaut und in den Orbit transportiert werden können. Picosatelliten setzen diesen Trend fort und bilden derzeit eine neue Satellitenklasse mit einer Gesamtmasse des Satelliten von max. 1 kg. Basierend auf einer Initiative der California Polytechnic State University und der Stanford University wurde die CubeSat-Spezifikation verfaßt, die vorwiegend mechanische Eigenschaften des Picosatelliten beschreibt. Im Juni 2003 wurden die ersten CubeSats gestartet, einige funktionieren noch heute. Mit Picosatelliten lassen sich zukünftig Formationsflüge und Konstellationen zur Etablierung neuer Anwendungen realisieren.

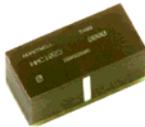
Am Institut für Luft- und Raumfahrt der TU Berlin wurde ein Picosatellitenprojekt begonnen, das den Bau eines CubeSats und dessen Betrieb im niedrigen Erdbit zum Ziel hat. Dieses Projekt mit dem Namen „Berlin Experimental and Educational Satellite“ (BEESAT) befindet sich derzeit in der detaillierten Entwurfsphase. Diese Phase ist gekennzeichnet durch die Auswahl geeigneter Komponenten. Für Picosatelliten gelten hierbei besondere Anforderungen an Größe, Masse und Energieverbrauch. Viele Komponenten, die für Picosatelliten benötigt werden, sind nicht verfügbar oder nur mit beschränkter Leistungsfähigkeit. Des Weiteren wird bei der CubeSat-Entwicklung die Verwendung von „commercial off-the-shelf“-Komponenten (COTS) angestrebt. Im Rahmen der Komponentenauswahl wurden an der TU Berlin COTS-Sensoren auf ihre Eignung zur Lagebestimmung unter Laborbedingungen und mit dem Höhenforschungsexperiment TUPEX (TU Berlin Picosatellite Experiment) untersucht.

2 Untersuchte Sensoren zur Lagebestimmung

In Satelliten werden zur Lagebestimmung Sensoren eingesetzt, die die Ermittlung eines Vektors zu einem Orientierungspunkt mit bekannten Koordinaten ermöglichen. Für Erdorbits kommen die Erde selbst, der Mond, die Sonne und andere Fixsterne in Betracht. Auch kann die Lage am Magnetfeld der Erde ermittelt werden. Lageänderungen werden durch Messung der Drehrate des Satelliten gemessen.

An der TU Berlin werden kommerziell verfügbare Drehratensensoren und Magnetfeldsensoren auf ihre Eignung zur Lagebestimmung in Picosatellitenplattformen untersucht. Des weiteren wurde ein Sonnensensor entwickelt, mit dessen Hilfe die Lage des Satelliten relativ zur Sonne ermittelt werden kann. Er besteht hauptsächlich aus einem zweidimensionalen, lichtempfindlichen Detektor (basierend auf dem Prinzip der Fotodiode) und einer Lochmaske. Eine Übersicht der untersuchten Sensoren mit den wichtigsten technischen Daten liefert Tab. 1.

Tab. 1: Technische Daten der untersuchten Sensoren

	Gyroskop	Magnetfeldsensor	Sonnensensor
			
		Quelle: Honeywell	Quelle: Hamamatsu
Typ	ADXR150	HMC1023	S7848
Hersteller	Analog Devices	Honeywell	Hamamatsu
Abmessungen	7 x 7 x 3 mm ³	8,1 x 3,8 x 4,3 mm ³	7 x 4,8 x 1,8 mm ³
Versorgungsspannung	5 V	3,3 V	–
Elektrische Leistungsaufnahme	30 mW	36 mW	–
Messbereich	± 150 °/sec.	± 6 Gauss	2 mm x 2 mm
Sensitivität (typ.)	12,5 mV ^o /sec.	3,3 mV/Gauss	0,58 A/W
Temperatur im Betrieb:	–40 ... +85 °C	–40 ... +125 °C	–25 ... +85 °C
Zusätzlich benötigte Bauteile	Kapazitäten	Operationsverstärker zur Signalverstärkung, Transistoren und Kapazitäten für Set-/Reset-Schaltung	Lochmaske, Operationsverstärker zur Signalverstärkung

3 Höhenforschungsexperiment TUPEX

TUPEX ist ein Studentenprojekt, das im Sommersemester 2005 begann. Hauptziele des Projekts waren die Ausbildung von Studierenden sowie der Test von Picosatellitentechnologien unter Weltraumbedingungen. Die Definitionsphase wurde im Rahmen einer Lehrveranstal-

tung des Fachgebiets Raumfahrttechnik am Institut für Luft- und Raumfahrt durchgeführt. In der anschließenden detaillierten Entwurfsphase, beim Bau und der Inbetriebnahme waren sieben Studierende beteiligt.

In Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) und der Swedish Space Corporation (SSC) wurde im Rahmen des REXUS-Programms eine Höhenforschungsrakete in Kiruna/Esrange (Schweden) gestartet. Sie enthielt neben anderen Experimenten das von Studenten der TU Berlin entwickelte Experiment TUPEX.

TUPEX besteht aus einer Hauptbox sowie 2 an der Außenseite der Rakete angebrachten Solarboards (siehe Abb. 1)

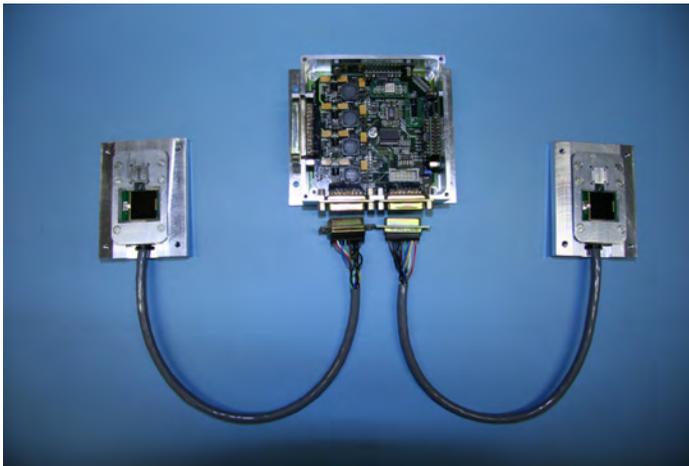


Abb. 1: TUPEX (Hauptbox und Solarboards)

In der Hauptbox befindet sich die Hauptplatine mit Spannungswandlern, Microcontroller, Flash-Speicher und Analog/Digital-Umsetzern (siehe Abb. 2). Des Weiteren befinden sich in der Hauptbox Sensoren zur Messung von Drehraten, Beschleunigungen, Magnetfeldstärken jeweils in 3 Achsen sowie Temperatursensoren. Die Box wird von der Rakete mit einer unregelmäßigen Batteriespannung von 28 V (nominell) versorgt. Telemetriedaten werden an die Rakete über eine RS-422-Schnittstelle übermittelt. An die Box werden die zwei Solarboards angeschlossen und von der Hauptplatine mit geregelten Spannungen versorgt. Die Solarboards nehmen eine Platine auf, die mit einer Solarzelle, dem Sonnensensor inklusive Signalverstärkung mittels Operationsverstärker sowie einem Temperatursensor bestückt sind. Die TUPEX-Hauptbox ist wiederverwendbar, an ihr können auch andere Außeneinheiten mit insgesamt 14 zu erfassenden Messwerten angeschlossen werden.

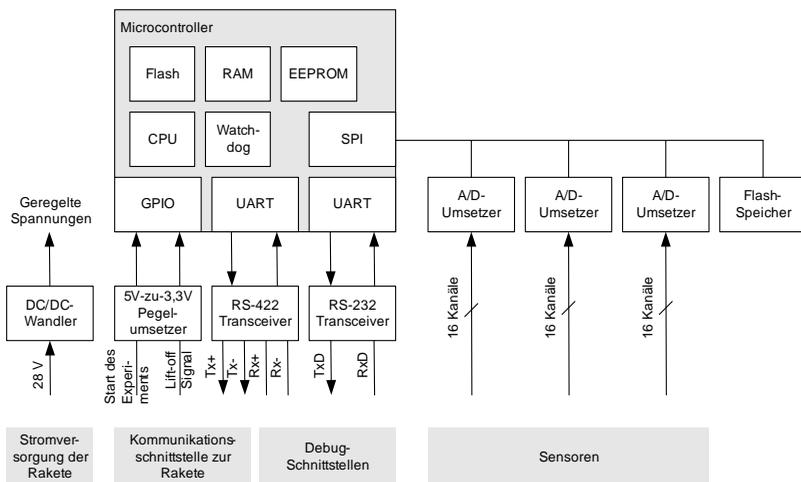


Abb. 2: TUPEX-Bordcomputer

4 Ergebnisse

Der Start der Rexus-3-Rakete erfolgte am 5. April 2006 vom Ballon- und Raketentestgelände Esrange Space Center nahe Kiruna in Schweden. Die einstufige Rakete mit einer Gesamtnutzlast von rund 100 kg erreichte eine Höhe von 94,4 km und flog ca. 67 km weit. Der Flug dauerte etwa 10 Minuten. TUPEX funktionierte während des Fluges und nach der Landung einwandfrei. Vor dem Start und während des Fluges wurden die erfassten Messwerte in einem nichtflüchtigen Speicher abgelegt und simultan an das Service-Modul der Rakete übermittelt, das die Daten per Funk an die Bodenstation sendete. Am Boden konnten die Daten bereits während des Fluges gespeichert und visualisiert werden. Nach Bergung der Raketenutzlast wurden die gespeicherten Daten aus TUPEX ausgelesen und ausgewertet.

Aus den Messwerten des TUPEX-Beschleunigungssensors in Flugrichtung können die einzelnen Phasen des Fluges abgelesen werden (siehe Abb. 3): Start, Aufstieg, Microgravitation, Wiedereintritt in die Atmosphäre sowie Sinkflug am Fallschirm. Während der Boost-Phase des Dual-Thrust-Antriebs wurde eine maximale quasistatische Beschleunigung in Flugrichtung von 19,6 g (inkl. Erdbeschleunigung) gemessen. Die zweite Phase ab 6,5 Sekunden nach dem Start erreichte ca. 6,2 g. Etwa 26 Sekunden nach dem Start war der Raketenmotor ausgebrannt und die Microgravitationsphase begann. Der Beschleunigungs-Peak von etwa 6 g bei ca. 69 Sekunden wurde durch die Motorseparation verursacht. Der Wiedereintritt erfolgte ca. 4 Minuten nach Raketenstart.

Nachfolgend werden die Ergebnisse für die untersuchten Sensoren erläutert.

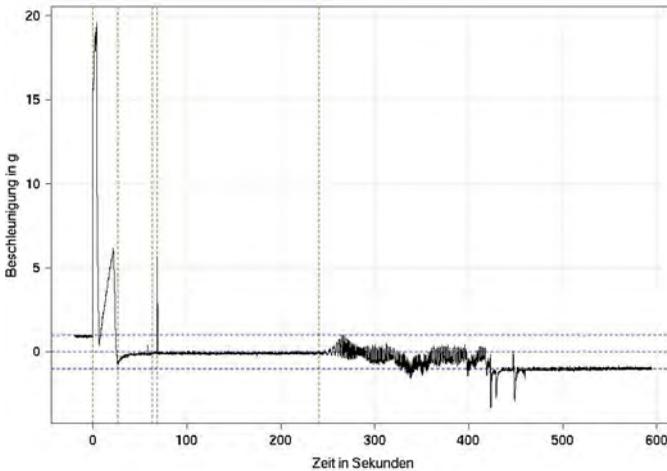


Abb. 3: Beschleunigung in Flugrichtung (x-Achse)

4.1 Gyroskop

Alle drei Gyroskope lieferten plausible Werte. Auf Grund der Spin-Stabilisierung der Rakete (ca. 4 Umdrehungen pro Sekunde) war das Gyroskop in Flugrichtung kurz nach dem Start gesättigt (siehe Abb. 4). Nach Freigabe der Jojo-Massen (ca. 63 Sekunden nach Start) wurde der Spin auf annähernd Null abgebaut. Kurz nach der Motorseparation verhielten sich die Werte der 3 Gyroskope unerwartet. Nach dem Flug wurde eine ungeplante Kollision zwischen dem Nutzlastsegment der Rakete und einem zuvor separierten Experiment festgestellt, die zu einer Taumelbewegung des Nutzlastsegments führte. Dies erklärt den in dieser Phase sinusförmigen Verlauf der Drehraten um beide Querachsen (siehe Abb. 5 und Abb. 6). Die Drehrate um die Achse in Längsrichtung betrug etwa $27,4 \text{ }^\circ/\text{Sek}$. Die Taumelbewegung wurde durch Kameraaufnahmen anderer Experimente visuell bestätigt. Beim Wiedereintritt in die Atmosphäre lieferten die Gyros unvorhersagbare Werte. Nach Entfaltung des Fallschirms wurde in Flugrichtung eine Pendelbewegung gemessen. Die Drehraten in den beiden Querachsen sind in dieser Phase sehr gering. Gegen Ende des Flugs sind die Drehraten in allen Achsen nur annähernd Null, da die Messwerte einen temperaturabhängigen Offset aufweisen. In Abb. 7 ist beispielhaft der Temperaturverlauf eines der drei Gyroskope dargestellt. In der Aufstiegsphase der Rakete wurden an der Außenhülle vom Sensor auf den Solarboards Temperaturen von bis zu $159 \text{ }^\circ\text{C}$ gemessen. Die Wärme wurde über die Raketenstruktur ins Innere der TUPEX-Hauptbox und damit zu den Drehratensensoren übertragen. Kleine Schwankungen im Temperaturverlauf sind auf Signaleinkopplungen digitaler Schaltungsteile zurückzuführen.

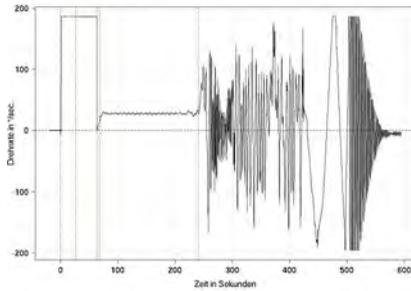


Abb. 4: Drehrate um x-Achse (Flugrichtung)

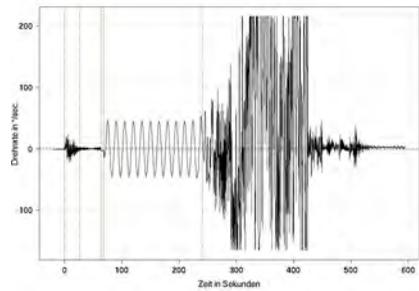


Abb. 5: Drehrate um y-Achse

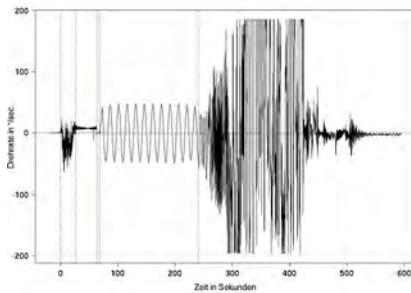


Abb. 6: Drehrate um z-Achse

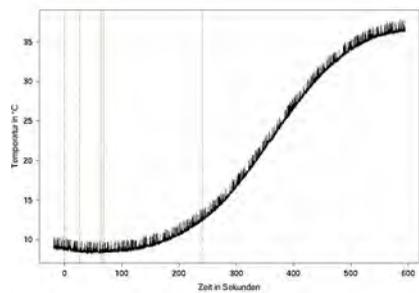


Abb. 7: Temperaturverlauf des Gyroskops (x-Achse)

4.2 Magnetfeldsensor

Die Messergebnisse des Magnetfeldstärkesensors sind in Abb. 8 nur für die Achse in Flugrichtung dargestellt. Die Werte sind sehr verrauscht. Nach dem Flug wurde ein Ausfall der Set-/Reset-Schaltung festgestellt, die für die Entmagnetisierung des Sensors verantwortlich ist. Dennoch lassen sich die einzelnen Missionsphasen identifizieren: vor dem Start, Aufstiegsphase mit geringen Änderungen in den Werten, Microgravitationsphase mit Taumelbewegung des Raketennutzlastsegments und der Wiedereintritt mit unvorhersagbaren Werten. Am Fallschirm hängend zeigt das Raketennutzlastsegment in umgekehrte Richtung gegenüber der Aufstiegsphase. Dies zeigt sich am umgekehrten Vorzeichen der Werte.

4.3 Sonnensensor

In Abb. 9 sind für einen der beiden Sonnensensoren die detektierten Positionen, an denen das Sonnenlicht während der Microgravitationsphase durch die Lochmaske auf die Sensoroberfläche fällt, dargestellt. Ungültige Werte verursacht durch das Erdalbedo oder Dunkelheit wurden hierbei herausgefiltert. In Abb. 10 und Abb. 11 sind die ermittelten Einfallswinkel für

die 2 Achsen des Sonnensensors im körpereigenen Koordinatensystem dargestellt. Die Auswertung wird erschwert durch die im Abschnitt 4.1 erwähnte Drehung der Nutzlast um die Achse in Längsrichtung und die Taumelbewegung.

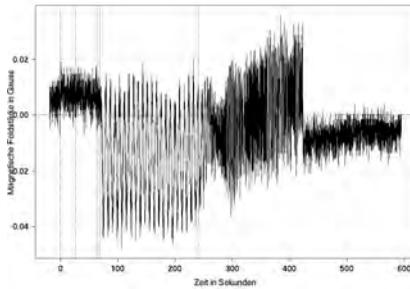


Abb. 8: Magnetische Feldstärke in Flugrichtung

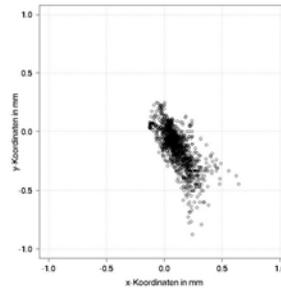


Abb. 9: Detektierte Positionen auf der Oberfläche des Sonnensensors

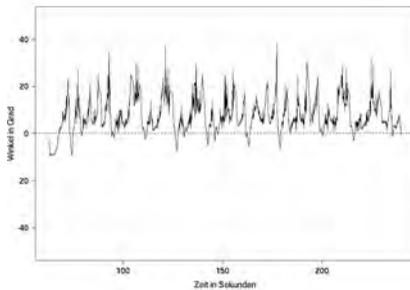


Abb. 10: Ermittelter Winkel zur Sonne (x-Komponente)

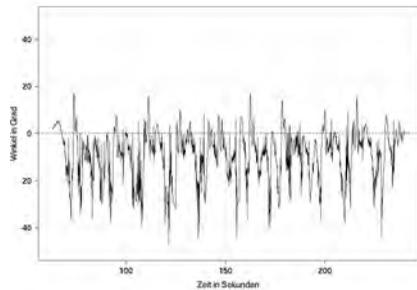


Abb. 11: Ermittelter Winkel zur Sonne (y-Komponente)

5 Ausblick

TUPEX war ein erfolgreiches Experiment, das wertvolle Erfahrungen und Erkenntnisse lieferte. Die untersuchten Sensoren und die Testumgebung haben die Belastungen der Startphase überstanden und waren wenige Minuten Weltraumbedingungen ausgesetzt. Die Auswertung der Daten ist noch nicht abgeschlossen. Für den realen Einsatz der Sensoren zur Lagebestimmung müssen die Messwerte, insbesondere die des Magnetometers, geeignet gefiltert werden, um die Ergebnisse der Labortests zu bestätigen. Schlussfolgerungen zur Verbesserung des Sonnensensors werden noch erarbeitet. In einem nächsten Schritt könnten die Überarbeitungen zu einem weiteren Höhenforschungsexperiment führen.

6 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei den Studenten und Studentinnen, die am TUPEX-Projekt mitgewirkt haben: Hendrik Arend, Marco Berlin, Henrik Birke, Martin Drobczyk, André Fischer, Robert Geissler, Robert Grewe, Claudia Helling, Bianca Hofmann, Andreas Koch, Lars Marschner, Eiji Nakai, Christian Raschke, Denis Richter, Claas Rietze, Ramy Shoeib, Stephan Stoltz, Sebastian Trowitzsch, Valentin Wegner, Claudia Winterfeldt.

Nicht zuletzt bedanken sich die Autoren beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. für die Mitflugmöglichkeit und die gute Zusammenarbeit.

7 Literaturverzeichnis

- BAUMANN, F.; BRIEB, K. & KAYAL H., 2005: Drei-Achsen-stabilisierte Picosatellitenplattform für Fernerkundungsaufgaben. In: Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF), Band 14, S. 461–466.
- KAYAL H. & BRIEB, K., 2005: Pico Satellite Concept of TU-Berlin. In: Proceedings of 5th IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation, Berlin, Germany.
- RASCHKE, CH., 2006: Entwicklung eines Sonnensensorsystems für Picosatelliten. – Unveröffentlichte Studienarbeit. – Berlin (Technische Universität).
- STOLTZ, ST., 2006: Entwicklung eines Magnetfeldsensensorsystems für Picosatelliten. – Unveröffentlichte Studienarbeit. – Berlin (Technische Universität).
- TROWITZSCH, S.; BAUMANN, F. u. a., 2006: TUPEX – An Experimental Sounding Rocket Payload for Evaluation of Pico Satellite Technologies. In: Proceedings of Space Technology Education Conference (STEC), Braunschweig, Germany.

Ein modulares Sensorsystem zur multiskalaren Erfassung von dreidimensionalen Objekten

ANKO BÖRNER¹, MICHAEL SUPPA², THOMAS ABMAYR³, TIM BODENMÜLLER⁴, ANDREAS ECKARDT⁵, HEIKO HIRSCHMÜLLER⁶, KARSTEN SCHEIBE⁷ & BERNHARD STRACKENBROCK⁸

Zusammenfassung: Die dreidimensionale Erfassung unserer Umgebung ist eine Aufgabe mit wachsender Bedeutung. Für viele Applikationen auf unterschiedlichen Gebieten, wie in der Robotik, im Facility Management oder im Bereich der virtuellen Welten, werden Angaben zu räumlichen Ortskoordinaten benötigt, um Messwerte richtig zu interpretieren oder mit der Umwelt zu interagieren.

In dem Beitrag werden Sensoren vorgestellt, die in der Lage sind, Objekte bildhaft in unterschiedlichen Auflösungen aufzunehmen. Ein multisensorieller Sensorkopf kann Strukturen im Nahbereich erfassen. Diese können mit kleinmaßstäbigeren Daten von terrestrischen Sensoren, z.B. einer Panoramakamera und einem Laserscanner, kombiniert werden. Die Einbindung in einen globaleren Kontext kann über luftgestützte Zeilen- und Matrixkameras erfolgen. Der Mehrwert dieses Ansatzes liegt in der Kombination der verschiedenen Sensoren. Konzepte zur Kalibration und zur einheitlichen Datenverarbeitung werden vorgestellt, sie garantieren eine vergleichbare Qualität der Datenprodukte.

1 Einleitung

Die Erfassung der Umgebung mit Hilfe geeigneter Sensoren und die Ableitung von geometrischen, radiometrischen und spektralen Parametern aus den Sensordaten ist für viele wissenschaftliche, hoheitliche und industrielle Aufgabenstellungen von großer Bedeutung. Folgende Beispiele illustrieren das:

- Zur Aufnahme von Unfallszenarien bzw. bei der Erfassung eines Tatorts ist die Polizei an dreidimensionalen, texturierten Objektdaten interessiert. Zum Einsatz können Laserscanner und diverse Kameras kommen.
- Die Vermessung von Landschaften und Gebäuden ist Hauptzielgebiet der Photogrammetrie. Unterstützend zu terrestrischen, luft- oder bodengestützten Kamerasystemen können Laserscanner zum Einsatz kommen. Die Fernerkundung nutzt Informationen, die aus Spektraldaten abgeleitet werden können.

¹ Anko Börner, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Optische Informationssysteme, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin, e-mail: anko.boerner@dlr.de

² Michael Suppa, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Robotik und Mechatronik, Münchner Str. 20, 82234 Wessling, e-mail: michael.suppa@dlr.de

³ Thomas Abmayr, Zoller+Fröhlich GmbH, Simoniusstr. 22, D-88239 Wangen i.A., e-mail: info@zofre.de

⁴ Tim Bodenmüller, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Robotik und Mechatronik, Münchner Str. 20, 82234 Wessling, e-mail: tim.bodenmueller@dlr.de

⁵ Andreas Eckardt, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Optische Informationssysteme, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin, e-mail: andreas.eckardt@dlr.de

⁶ Heiko Hirschmüller, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Robotik und Mechatronik, Münchner Str. 20, 82234 Wessling, e-mail: heiko.hirschmueller@dlr.de

⁷ Karsten Scheibe, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Optische Informationssysteme, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin, e-mail: karsten.scheibe@dlr.de

⁸ Bernhard Strackenbrock, illustrated-architecture, Eichstädter Weg 43, 16727 Oberkrämer, e-mail: bs@illustrated-architecture.de

- Museen sind daran interessiert, diverse Kunst- und Kulturgüter aufzunehmen, um sie zu archivieren und der Nachwelt in digitaler Form zu hinterlassen. Neben Kameras und Laserscannern können auch IR-Systeme nützliche Zusatzinformationen liefern.
- In der Robotik ist die dreidimensionale Erfassung der Umgebung in Echtzeit die entscheidende Voraussetzung für ein autarkes Agieren in einer dynamischen Szene.
- Im Bereich des Facility Managements dienen die Erfassung der dreidimensionalen Umgebung und eine realitätsnahe Darstellung der radiometrischen Verhältnisse Planungs- und Gestaltungsaufgaben.

Generell richten sich die Systemkenngrößen der verwendeten Sensoren, wie beispielsweise das physikalische Wirkprinzip, der Spektralbereich, der Maßstab der Abbildung oder die Anforderungen an die Genauigkeit, nach der jeweiligen Applikation.

Für viele Anwendungen bietet ein Einzelsystem keine hinreichende Lösung. Das trifft vor allem dann zu, wenn sich Randbedingungen der Datenaufnahme ändern (veränderliche Szenerie und/oder Beleuchtung). An dieser Stelle bieten Multisensor-Ansätze Möglichkeiten, Schwachstellen eines Systems durch andere Sensoren zu kompensieren. Die Datenprodukte eines Multisensorsystems werden sich i. d. R. von denen eines Einzelsensors im Hinblick auf Qualität und Zuverlässigkeit unterscheiden. Der Mehrwert wird durch verschiedene Faktoren definiert, u. a. durch die Unabhängigkeit der Messverfahren.

Ein Multisensor-Ansatz setzt physische und logische Schnittstellen voraus. Das betrifft zum Beispiel Hardwarekomponenten, bei denen der Dateneinzug synchronisiert werden muss, oder Softwaremodule, die mit verschiedenen Input-Daten betrieben werden müssen.

Der Beitrag stellt ein modulares Multisensorsystem vor, durch das Anwender in die Lage versetzt werden, dreidimensionale und texturierte Daten von Objekten in unterschiedlichen Auflösungen zu generieren.

2 Modulares Sensorsystem

Das modulare Sensorsystem besteht aus drei Kernkomponenten – einem multisensoriellen Messkopf für großmaßstäbige sowie einem Laserscanner und einer CCD-Zeilenkamera für kleinmaßstäbige Aufnahmen. Alle drei Komponenten werden im Folgenden kurz vorgestellt.

2.1 Multisensorieller Messkopf

Der am Institut für Robotik und Mechatronik des DLR entwickelte multisensorielle Messkopf (Abb. 1) dient der großmaßstäbigen Erfassung von Objekten. Als Sensorsysteme kommen ein Laserentfernungsmesser, eine Texturkamera, eine Stereokamera und ein Lichtschnittmodul zum Einsatz.

Der Laserentfernungsmesser (HACKER et al, 1997) basiert auf dem Triangulationsprinzip. Die wesentlichen Merkmale sind geringes Gewicht, Robustheit und ein großer Blickwinkel. Die Messdistanz liegt im Bereich zwischen 50 und 300 mm. Der Textursensor besteht aus einem einzelnen kalibrierten Kamerakopf. Der Lichtschnittsensor (STROBL et al, 2004) verwendet ein Linienlasermodul in Kombination mit einer kalibrierten Miniaturkamera und ist für einen Messbereich zwischen 150 und 450 mm ausgelegt. Geometrische Informationen über weiter entfernte Objekte werden mit dem Stereosensor gewonnen. Alle Sensoren sind in ein speziell entwickeltes Gehäuse, das sich durch geringes Gewicht auszeichnet und ergonomisch geformt ist, integriert.

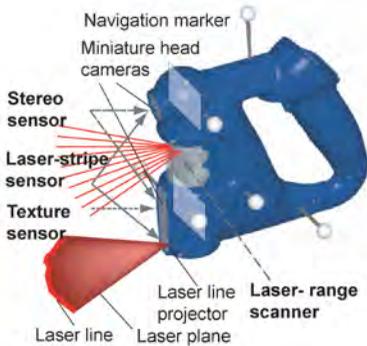


Abb. 1: Multisensorieller Messkopf



Abb. 2: Modell eines Mozart-Kopfes und die dazugehörige 3D-Punktwolke

Die Bestimmung der sechs Freiheitsgrade des Messkopfes wird entweder durch einen passiven Manipulator oder durch ein aktives optisches Trackingsystem realisiert.

Der Messkopf ist geeignet für kleine Messvolumen (im Bereich einiger Kubikmeter).

2.2 Laserscanner

In diesem Abschnitt wird ein kommerziell verfügbarer Sensor für die Erfassung von Objekten im mittleren Entfernungsbereich beschrieben.

Der Laserscanner Imager 5003 der Firma Zoller + Fröhlich (Abb. 3) ist ein optisches Messsystem, das auf der Transmission von Laserlicht basiert (FRÖHLICH, 1996 & LANGER et al, 1998). Der Laserscanner besteht aus einer eindimensionalen Messeinheit, die mit einer mechanischen Strahlableitvorrichtung kombiniert ist. Er ist für berührungsfreie Messungen mit hoher Genauigkeit und Robustheit entwickelt worden. Er ist für das Abscannen von Industrieanlagen und Produktionshallen, in denen Stillstandszeiten vermieden werden müssen, ebenso geeignet wie für Kunst- und Kulturstätten wie Kirchen und Schlösser, in denen die Besucher möglichst nicht gestört werden sollen. Das große Blickfeld des Scanners (360° horizontal und 310° vertikal) ermöglicht die komplette Erfassung von Szenarien von wenigen Standorten aus.

Außer den 3D-Distanzinformationen generiert der Imager 5003 zweidimensionale Reflektanzinformationen. Beide Datensätze korrespondieren, bedingt durch das Aufnahmeprinzip, ohne weitere Prozessierungsschritte miteinander. Die Erstellung genauer dreidimensionaler Modelle erfordert eine exakte Kalibrierung sowie die Nutzung angepasster Ansätze aus den Bereichen der Photogrammetrie und Bildverarbeitung.

Das Gerät besitzt verschiedene Scan-Modes, die sich in der räumlichen Auflösung unterscheiden: die beste Auflösung wird im Super-High-Resolution-Mode erzeugt (20000 Pixel horizontal und vertikal), die niedrigste im Preview-Mode (1275 Pixel). Die Aufnahmezeit ist sehr kurz, ein Scan mit dem üblicherweise in der Industrie angewendeten Moden (10000 Pixel horizontal, 5000 Pixel vertikal) benötigt lediglich 3,2 Minuten.



Abb. 3: Laserscanner Imager 5003 der Firma Zoller + Fröhlich



Abb. 4: Reflektanzbild des Laserscanners

2.3 Zeilenkamera

In der Einrichtung Optische Informationssysteme des DLR wurde in den letzten Monaten ein neues CCD-Zeilenscannersystem entwickelt – die MFC-Kamera (Modular Functional Camera Head).

Die MFC zeichnet sich durch einen modularen Aufbau aus. Kernstück der MFC sind Zeilenmodule, die eine RGB-Zeile, eine Strukturkeramik und die gesamte Front-End-Elektronik (FEE) beinhalten. Als Detektoren wurden CCD-Zeilen der Firma Kodak gewählt, die sowohl von ihren Gehäuseparametern als auch von ihrer Pinbelegung kompatibel sind. Momentan sind Zeilen mit 2k, 6k, 8k, 10k und 14k Detektorelementen verfügbar.

Der modulare Zeilenmodul-Ansatz unterscheidet sich grundsätzlich von klassischen Fokalebenen. Durch dieses Konzept vereinfachen sich Justage- und Kalibrationsprozesse erheblich. Außerdem wird ein hohes Maß an Flexibilität bei der Konfiguration von Kamerasystemen erreicht. Bis zu fünf RGB-Module können integriert werden. Damit ist der Stereowinkel je nach Anforderung einstellbar. Das analoge Ausgangssignal der CCD-Zeilen wird in der FEE digitalisiert. Systematische Fehler, wie Photo Response Non-Uniformity (PRNU) und Dunkelstrom, werden in Echtzeit korrigiert. Eine Echtzeit-JPEG-Kompression ist vorgesehen. Die digitalen Daten werden dem Empfangsrechner (z. B. Laptop, PC104-Stack) über einen USB2-Port zur Verfügung gestellt. Die MFC bietet verschiedene mechanische und elektrische Schnittstellen zu Inertialmesseinheiten (z. B. von Applanix oder IGI).

Erste Testkampagnen wurden mit der MFC durchgeführt, darunter ein Flugtest mit einem Kleinflugzeug über Potsdam sowie diverse Innenaufnahmen.

Die MFC ist bedingt durch ihren modularen Aufbau für viele Applikationen geeignet. Sie kann sowohl als Stand-Alone-System als auch als Zusatzgerät (z. B. für Laserscanner) für terrestrische oder luftgestützte Aufgaben eingesetzt werden.



Abb. 5: MFC-Zeilenmodul



Abb. 6: MFC, 3-Zeilen-Kamera

Die Fusion von Daten unterschiedlicher Quellen erfordert eine exakte räumliche und gegebenenfalls zeitliche Referenzierung der Daten. Dazu müssen die Systeme kalibriert sein.

Die Kalibration des 3D-Modellers beinhaltet Aspekte der zeitlichen und der räumlichen Referenzierung. Für die zeitliche Synchronisierung wurden alle Sensorsysteme mit einem Video-Synchronisationspuls ausgestattet. Ein echtzeitfähiger CAN-Bus dient als Master-Synchronisationsbus für den Austausch von Zeitstempeln und Positions- und Lagedaten. Die Kalibration der Kameras erfolgt unter Nutzung von Passpunktfeldern und unter Verwendung einfacher Kameramodelle, die in der Lage sind, die Parameter der internen (Hauptpunkt, Verzerrung) und externen Orientierung (Position und Lage) zu schätzen. Die Kalibration des Lasersystems beschränkt sich auf die Bestimmung einer Transformationsmatrix, die das Alignment zu einem Tool Center Point (TCP) beschreibt. An dieser Stelle finden dreidimensionale Kalibrationskörper Anwendung. Damit wird gewährleistet, dass alle Sensordaten in ein einheitliches Koordinatensystem überführt werden können.

Die Kalibrierung des Imager 5003 erfolgt durch Auswertung und Vergleich von Messmarken, sog. Targets. Wird der Scanner beim Abtasten des Raumes horizontal von 0 bis 360 Grad gedreht, so wird jede dieser Messmarken zweimal gescannt: Jedes Target wird sowohl mit einem Vertikalwinkel kleiner 180 Grad abgetastet („erste Lage“), als auch mit einem Vertikalwinkel größer 180 Grad („zweite Lage“). Aufgrund der Kenntnis des funktionalen Zusammenhangs der Fehler zwischen diesen Messmarken in Abhängigkeit zu den Winkeln lassen sich so Korrekturfunktionen sowohl für den Horizontal- als auch den Vertikalwinkel berechnen (ABMAYR et al, 2006).

Die geometrische, radiometrische und spektrale Kalibration der MFC-Kamera geschieht unter Nutzung diverser Labore des DLR. Die Bestimmung der Parameter der inneren Orientierung erfolgt pixelweise durch Beleuchtung einzelner Detektorelemente durch einen kollimierten Laserstrahl (SCHUSTER & BRAUNECKER, 2000). Das Kamerasystem wird dabei durch einen Manipulator bewegt. Die Parameter der äußeren Orientierung werden über adaptierte Bündelblockausgleich-Modelle bestimmt.

3 Datenverarbeitung

Ziel des Einsatzes des modularen Sensorsystems ist die Generierung von texturierten Oberflächenmodellen in unterschiedlichen räumlichen Auflösungen. Die Daten werden dabei von verschiedenen Sensoren generiert, was eine Definition von einheitlichen Schnittstellen und Datenformaten voraussetzt.

Bei den hier vorgestellten Ansätzen sind zwei Kernanforderungen an die Auswertesoftware zu stellen – die Prozessierungsmodule müssen generisch sein, um unterschiedliche Sensor-konfigurationen bedienen zu können, und die Software muss große Datensätze verarbeiten können.

3.1 Generierung von Oberflächenmodellen

Für die Generierung von Oberflächenmodellen wurde ein Online-Triangulations-Tool entwickelt, das in der Lage ist, auf 3D-Punkten basierende Dreiecksmaschen in Echtzeit zu erzeugen und zu verbessern. Dabei werden neu erzeugte Punkte permanent in das bestehende Modell eingefügt.

Die Verarbeitungskette besteht aus vier Schritten (BODENMÜLLER & HIRZINGER, 2004):

- Reduktion der Inputdaten: Beim permanenten Einfügen von Punkten durch wiederholtes räumliches Abtasten entstehen unnötige, redundante Informationen. Um das zu vermeiden, werden Punkte nur dann in die 3D-Punktswolke eingefügt, wenn sich kein anderer Punkt in einer definierten Umgebung befindet.
- Schätzung des Normalenvektors: Der Normalenvektor am eingefügten Punkt wird unter Einbeziehung der Normalenvektoren in der lokalen Umgebung geschätzt. Es ist zu beachten, dass im Umkehrschluss auch die Normalenvektoren in der Umgebung durch den eingefügten Punkt beeinflusst werden.
- Auswahl des Scheitelpunktes: Neu erfasste 3D-Punkte werden nur dann in die Punktswolke aufgenommen, wenn die Schätzung des Normalenvektors konvergiert.
- Re-Triangulation: Werden die in den vorangegangenen Schritten aufgelisteten Kriterien erfüllt, wird der neue Punkt akzeptiert. Die Triangulation der Punktswolke wird lokal erneuert.

3.2 Optimierung des Gitternetzes

Die Optimierung des durch die 3D-Punktswolke definierten Gitternetzes wird über folgende Stufen realisiert (HIRZINGER et al, 2005):

- Auffüllen der Löcher: Löcher im erzeugten Gitternetz resultieren aus einer falschen Schätzung des Normalenvektors bzw. einer fehlerhaften Triangulation. Diverse Algorithmen wurden entwickelt, um diese Fehler zu identifizieren und eliminieren.
- Reduktion des Gitternetzes: Punkte des Gitternetzes können entfernt werden, wenn sich ihre Normalenvektoren nicht signifikant von denen der Umgebung unterscheiden. Gerade bei von Menschen geschaffenen Strukturen ergibt sich ein enormes Potenzial für eine Datenreduktion.
- Glättung: Zur Minimierung der Einflüsse der Punktreduktion werden verschiedene Filteralgorithmen verwendet.

3.3 Texture Mapping

Unter Texture Mapping wird an dieser Stelle die Projektion einer photorealistischen Textur auf ein Oberflächenmodell verstanden. Die Texturen selbst können von terrestrischen, flugzeug- oder satellitengestützten Sensorsystemen stammen. Dabei ist es unerheblich, ob Zeilen- oder Matrixsensoren zum Einsatz kommen (REULKE, 2003).

Texture Mapping setzt voraus, dass 3D- und Texturdaten in einem einheitlichen Weltkoordinatensystem vorliegen. Bei Kenntnis der Blickrichtung eines Pixels kann ein Sichtstrahl definiert werden, der ein Objekt trifft (Raytracing). Dem Objektpunkt wird dann die Farbe des

Texturpixels zugewiesen. Die Qualität des Texture Mappings hängt entscheidend von der Genauigkeit der Kenntnis der Parameter der inneren und äußeren Orientierung ab.

Prinzipiell ist es möglich, Texturdaten zu verarbeiten, die von unterschiedlichen Sensoren, von unterschiedlichen Orten oder zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen wurden, beispielsweise um Verdeckungseffekte zu kompensieren. Um in Überlappungsbereichen Störungen des visuellen Eindrucks zu verhindern oder zu minimieren, wäre es notwendig, die spektralen und radiometrischen Eigenschaften des Sensors, die reflektiven Eigenschaften des erfassten Objektes, die Strahlungseigenschaften der Lichtquelle und gegebenenfalls die Transmissionseigenschaften der Atmosphäre zu kennen. Da das in der Regel nicht ohne weiteres möglich ist, ist die Anzahl der Aufnahmen zur Texturgewinnung gering zu halten.

3.4 Matching

Matchingverfahren wurden für verschiedene Teilaufgabenstellungen eingesetzt. Für die Kombination von Daten von unterschiedlichen Laserscans wurde ein Algorithmus entwickelt, der eine Referenzierung der Scans zueinander ohne Passmarken gestattet (LIU & HIRZINGER, 2005).

Die Auswertung von luft- oder satellitengestützten Stereodaten ist ein weiteres Anwendungsgebiet für Matchingalgorithmen. Für diese Aufgaben wurde ein leistungsfähiges Tool entwickelt, dass in der Lage ist, den hohen Qualitätsanforderungen der Photogrammetrie gerecht zu werden (z. B. Erhaltung von Objektkanten) und dabei große Datensätze in akzeptabler Zeit zu verarbeiten. Die Grundidee des Algorithmus basiert auf einem Semi-Global-Matching-Ansatz (HIRSCHMÜLLER, 2005). Der Algorithmus zielt auf die Bestimmung der pixelweisen Disparität durch die Minimierung einer lokalen Kostenfunktion. Das Matchingergebnis wird für die Erstellung dreidimensionaler Oberflächenmodelle und für die nachfolgende Generierung von Orthophotos verwendet.

4 Ausblick

Die Fusion von Daten mit verschiedenen Eigenschaften und aus unterschiedlichen Quellen ist die wesentliche Voraussetzung für die Generierung von komplexen dreidimensionalen Modellen unserer Umgebung. In dem Beitrag wurde ein modulares Sensorsystem vorgestellt, das durch die Kombination verschiedener Einzelgeräte in der Lage ist, Objekte in unterschiedlicher Auflösung zu erfassen. Durch vereinheitlichte Schnittstellen, Verarbeitungsroutinen und Datenprodukte ist es gelungen, diese Daten zu einem konsistenten Gesamtmodell zu vereinen und damit für vielfältige Anwendungen in Wissenschaft und Industrie zur Verfügung zu stellen.

5 Literaturverzeichnis

ABMAYR, T., HÄRTL, F., BREITNER, M., EHM, M. & FRÖHLICH, C., 2006: Multimodale Sensorfusion auf Basis des Imager 5003; Photogrammetrie, Laserscanning, optische 3D-Meßtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D Tage 2006; Wichmann Verlag; Hrsg. Luhmann/Müller

- BODENMÜLLER, T. & HIRZINGER, G., 2004: Online Surface Reconstruction From Unorganized 3D-Points for the DLR Hand-guided Scanner System. In Proc. of the 2nd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission, 285–292, Thessaloniki, Greece, 6-9 September, 2004
- FRÖHLICH, C. 1996: Aktive Erzeugung korrespondierender Tiefen- und Reflektivitätsbilder und ihre Nutzung zur Umgebungserfassung. PhD Thesis, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Technische Universität München
- HACKER, F., DIETRICH, J. & HIRZINGER, G. 1997: A Laser-Triangulation Based Miniaturized 2-D Range-Scanner as Integral Part of a Multisensory Robot-Gripper. In EOS Topical Meeting on Optoelectronic Distance/Displacement Measurements and Applications, Nantes, France, 8-10 July, 1997
- HIRSCHMÜLLER, H. 2005: Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. In Proc. of the IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2005), San Diego, USA, pp. 807 - 814, 20-25 June, 2005
- HIRZINGER, G., BODENMÜLLER, T., HIRSCHMÜLLER, H., LIU, R., SEPP, W., SUPPA, M., ABMAYR, T. & STRACKENBROCK, B., 2005: Photo-realistic 3D modelling - From robotics perception towards cultural heritage. International Workshop on Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage, Ascona, Switzerland, May 22-27, 2005
- LANGER, D., HANCOOK, J., MARTIAL HEBERT, M., HOFFMANN, E., METTENLEITER, M. & FRÖHLICH, C. 1998: Active Laser Radar for High-performance measurements. In Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 98), pp. 1465 - 1470, Leuven, 16-21 May, 1998
- LIU, R. & HIRZINGER, G. 2005: Marker-Free Automatic Matching of Range Data. In Proc. of the 2nd Panoramic Photogrammetry Workshop 2005, Berlin, Germany, (on CD-ROM).
- REULKE, R., WEHR, A., KLETTE, R., SCHEELE, M. & SCHEIBE, K., 2003: Panoramic Mapping using CCD-Line Camera and Laser Scanner with Integrated Position and Orientation System, IVCNZ 2003, proceedings, ed. D. Bailey, pp. 72-77.
- SCHUSTER, R. & BRAUNECKER, B., 2000: Design and Calibration of the ADS40 Airborne Camera; Proceedings of the XIX ISPRS Congress, Amsterdam, The Netherlands, S.288
- STROBL, K., WAHL, E., SEPP, W., BODENMÜLLER, T., SUPPA, M. & HIRZINGER, G. 2004: The DLR Hand-guided Device: The Laser-Stripe Profiler. In Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2004), 1927–1932, New Orleans, 26 April - 1 May, 2004

Neue optische Sensorsysteme für die Erdbeobachtung

ANDREAS ECKARDT¹, ANKO BÖRNER², HERBERT JAHN³, STEFAN HILBERT⁴ & INGO WALTER⁵

Zusammenfassung: Die technischen Entwicklungen auf dem Gebiet der Detektoren einerseits und die Änderung der nationalen und internationalen raumfahrtpolitischen Randbedingungen andererseits führten in den letzten Monaten zu einer Vielzahl von Projektvorschlägen für satellitengestützte Sensorsysteme für die Erdfernerkundung. Mit der kommerziellen Verfügbarkeit von TDI-Zeilen sowie schnell auslesbaren CCD-Matrizen ergeben sich neue Möglichkeiten für geometrisch bzw. radiometrisch hochauflösende Sensoren und damit für neuartige Datenprodukte. Die Bedeutung systemischer Ansätze bei der Konzipierung solcher Sensoren steigt durch die Forderungen nach leistungsfähigen Sensoren für bestimmte Aufgabenstellungen. Ausgehend von systemtheoretischen Betrachtungen werden optische, mechanische und elektronische Systemkomponenten entworfen und gefertigt. Die einzelnen Module und das Gesamtsystem sind mit geeigneten Verfahren zu kalibrieren. Der Beitrag gibt einen Überblick über die Aktivitäten im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt auf dem Gebiet.

Einleitung und Motivation

Die Einrichtung Optische Informationssysteme des DLR hat seit mehr als 25 Jahren Erfahrungen mit der Entwicklung optimierter hochauflösender Kamerasysteme. Durch die Verwendung von herkömmlichen CCD/CMOS-Zeilen und -Matrizen und angepassten Objektiven war man schnell in der Lage, sowohl die räumlich hohe Auflösung als auch eine gute Radiometrie zu garantieren.

Es stellte sich jedoch schnell heraus, dass in Innenräumen nur dann qualitativ gute Farbaufnahmen gemacht werden können, wenn die Räume mit hinreichend großer Lichtleistung ausgeleuchtet werden. Gleiches gilt für Bildaufnahmebedingungen vom Satelliten und vom Flugzeug aus. Eine der bekanntesten Lösungsmöglichkeiten für derartige Anwendungen bestanden darin, die Spektralfilter dieser Systeme so breit wie möglich zu gestalten und die Öffnung der Objektive so klein, wie es technisch vertretbar ist, auszulegen. Eine weitere, mögliche technologische Lösungsvariante besteht in der mehr als zwanzig Jahre bekannten TDI-Technologie. Mit Hilfe derartiger Technologien können Zeilenscannersysteme der zweiten Generation entwickelt werden, die mit Hilfe ihrer höheren Empfindlichkeit in der Lage sind, sich automatisch an die jeweiligen Belichtungsverhältnisse anzupassen.

Einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf optische Systeme neuester Generation haben Standardisierungen in der IT-Technologie und den Sensortechnologien. Derartige Systeme

¹ Dr.-Ing. Andreas Eckardt, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Optische Informationssysteme, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin, e-mail: andreas.eckardt@dlr.de

² Dr.-Ing. Anko Börner, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Optische Informationssysteme, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin, e-mail: anko.boerner@dlr.de

³ Prof. Dr. Herbert Jahn, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Optische Informationssysteme, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin, e-mail: herbert.jahn@dlr.de

⁴ Stefan Hilbert, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Optische Informationssysteme, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin, e-mail: stefan.hilbert@dlr.de

⁵ Ingo Walter, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Optische Informationssysteme, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin, e-mail: ingo.walter@dlr.de

werden hinsichtlich der Technologie und im Preis-Nutzen-Verhältnis einen erheblichen Nutzen für den Anwender darstellen. Zur technologischen Konzeptprüfung werden derartige Systeme im DLR entwickelt und verifiziert.

Elektronische Radiometrieanpassung

Aus Gleichung (1) zur Berechnung der Elektronenzahl ist ersichtlich, dass die Empfindlichkeit eines Sensors direkt proportional zur Sensorfläche [A] und zur Integrationszeit [t_{int}] ist. Auf Grund dessen, dass die zweite Generation optischer Sensoren in der Lage sein soll, die Empfindlichkeit an die Beleuchtungsverhältnisse vor Ort zu adaptieren, kommt genau diesem Designaspekt eine große Bedeutung zu.

$$n_e = \frac{\pi}{4 \cdot f_{no}^2} \cdot \tau(\lambda) \cdot QE(\lambda) \cdot I_{Ground}(\lambda) \cdot T_{Atmosphere}(\lambda) \cdot \frac{\lambda}{h \cdot c} \cdot \Delta\lambda \cdot A_{det} \cdot fillfactor \cdot \tau_{int} \quad (1)$$

n_e	Anzahl der pro Pixel generierten Elektronen
f_{no}	F-Number der Optik
$\tau(\lambda)$	Transmission der Optik
$QE(\lambda)$	Quanteneffizienz der CCD
$I_{ground}(\lambda)$	Spektrale Strahldichte
$T_{Atmosphere}(\lambda)$	Transmission der Atmosphäre
$\Delta\lambda$	Spektrale Bandbreite
A_{det}	Nominale Detektorfläche
$fillfactor$	Faktor für die effektive Detektorfläche
τ_{int}	Integrationszeit

Gleichung (1) gibt zusätzlich den Zusammenhang zwischen verschiedenen Parametern, die einen Einfluss auf die Anzahl der Elektronen als Signalladung und somit auf die Empfindlichkeit haben. Es lässt sich schnell erkennen, dass Objektive mit möglichst kleiner Blendenzahl [F] eingesetzt werden sollten und die spektralen Filter [$d\lambda$] je nach Applikation, so breit wie möglich, zu implementieren sind. Auch unter allen diesen Randparametern kann derzeit kein Sensorsystem entwickelt werden, das über eine hinreichend große Empfindlichkeit verfügt, die man elektronisch steuern kann. Zur Lösung dieses Problems trägt ein Verfahren aus der Raumfahrt bei, das bereits seit über zwanzig Jahren bekannt ist. Dieses so genannte Time Delay and Integration (TDI)-Verfahren wird in Abbildung 1 dargestellt.

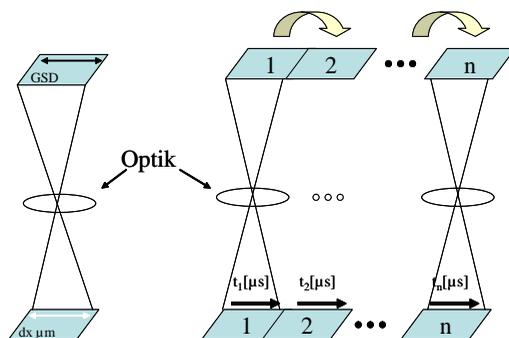


Abb. 1: TDI-Prinzip

Das TDI-Verfahren reduziert das für Quantensensoren dominante Photonenrauschen (auch als shot noise bekannt) durch Mehrfachbelichtung ein und desselben Pixels. Die Anzahl der Belichtungen ist abhängig von der Anzahl der TDI-Stufen und der notwendigen Vorwärtsbewegung. Gleichung (2) zeigt, welchen Einfluss die TDI-Stufen des Sensors auf das Photonenrauschen haben. Dieses Verfahren kommt einer Vergrößerung der Apertur auf elektronischem Weg gleich.

$$Photon_SNR_{TDI} = Photon_SNR * \sqrt{Nr_TDI_Steps} \quad (2)$$

Terrestrische Applikation einer TDI-Kamera

Eine der Anwendungen einer radiometrischen Anpassung an die Umgebungsparameter wurde mit der LLPC (Low Light Panoramic Camera) implementiert. Abbildung 2 zeigt das Design der LLPC, das für die Objektiv-Strahlteilerkombination gewählt wurde. Das Konzept des diskreten Aufbaus der Fokalmodule hat den Vorteil, dass alle Module in den erforderlichen Freiheitsgraden justierbar sind. Gegenwärtig sind dafür im Sinne eines Prototyps alle sechs Freiheitsgrade jedes Kanals justierbar. In einer Weiterentwicklung kann entsprechend den technologischen Erfahrungen diese Zahl eingeschränkt werden. Abbildung 3 zeigt die Objektiv-Strahlteileranordnung mit angesetzten Fokalebene-Modulen. Der Strahlteiler dient dabei als optomechanischer „Knoten“ der Konstruktion.



Abb. 2: Design der LLPC

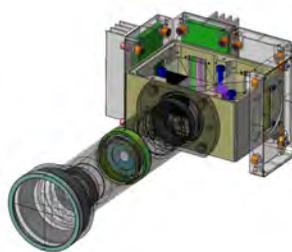


Abb. 3: Elektromechanisches Design

Die Elektronik der LLPC zur AD-Wandlung bis zum Digital-Interface ist in je einem Block für jeweils zwei Kanäle integriert und wird über eine flexible Leiterkarte mit der sensornahen Elektronik auf dem Fokalmodule verbunden. Jeder Elektronikblock enthält ein AD-Board, einen 64Bit-Frame-Grabber und ein Interface-Board, das die Schnittstelle zu einem abgesetzten 64Bit-PC für Kommandierung und Datenmanagement – die Bilddaten werden im 48Bit-TIF-Format gespeichert – ist. Abbildung 4 zeigt die bereits entwickelten Elektronikarten.

Die Elektronik ist in der Lage, alle systematischen Fehler in Echtzeit zu korrigieren. Somit kann das System zur automatischen Korrektur von PRNU- und DSNU-Effekten eingesetzt werden. Die Erzeugung des 48Bit-TIF-Datenformates wird im PC organisiert. Im TIF-Header werden alle zusätzlichen Informationen zur Bildaufnahme geschrieben. Typischerweise wird dem Nutzer eine 1kByte-ASCII-Textbeschreibung zu Verfügung gestellt. Auch Informationen zur Lage und Position, falls vorhanden, werden im Header abgelegt.

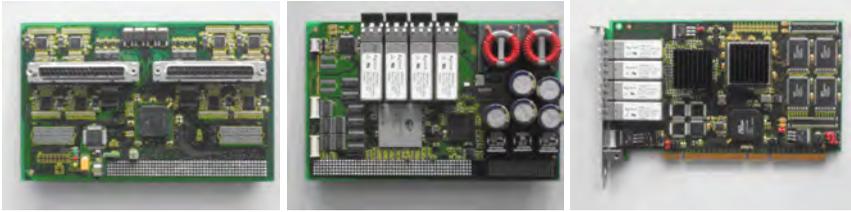


Abb. 4: Elektronikkomponenten der LLPC-Kamera-Elektronik:
AD-Board, Interface-Board und 64Bit-Frame-Grabber (von links)

Eine vorläufige Zusammenfassung der wesentlichsten Parameter ist in Tabelle 1 gegeben. Die Spektralbereiche sind gegenwärtig durch den Einsatz von Standardfiltern bestimmt.

Tab. 1 Spezifikation der LLPC

Fokallänge	62 mm/F 5,6
Pixelgröße	13 μm
Anzahl der TDI-Pixel pro Zeile	2048 Pixel
Programmierbare TDI-Steps	24, 48, 64, 96
Dynamikbereich	14 bit
Radiometrische Auflösung	14 bit
Maximale TDI-Zeilenfrequenz	39.000 Hz
Spektralkanäle	
• Rot	620 - 700 nm
• Grün	510 - 560 nm
• Blau	400 - 500 nm
• Nahes Infrarot	780 - 1200 nm

KompSat3-Projekt

Die Einrichtung Optische Informationssysteme des DLR hat gemeinsam mit der Firma EADS Astrium GmbH in Friedrichshafen die internationale Ausschreibung für die optische Payload für das KompSat3-[Korean Multi Purpose Satellite]-Projekt gewonnen. Eine für die Erdbeobachtung bekannte technologische Basis bildet die TDI-Technologie. Für das KompSat3-Projekt werden spezifische und optimierte TDI-Sensoren entwickelt, damit allen Anforderungen im Projekt entsprochen werden kann. Die optische Payload entspricht der QuickBird-Klasse bei verdoppelter Schwadbreite.

Tabelle 2 zeigt die Spezifikation der optischen KompSat3-Payload.

Tab. 2 Spezifikation der KompSat3-Payload

Anzahl der Pixel PAN	24.000
PAN-Sensor	2 x 12.080-TDI
Zeilenfrequenz PAN	10 kHz +5/-50 %
CCD-Output-Rate PAN	16 x 15MPixel/s
Datenrate PAN	3,84 Gbit/s
MS-Sensor	8 x 6.000-TDI
Zeilenfrequenz MS	2,5 kHz +5/-50 %
CCD-Output-Rate MS	2 x 7,5 MPixel/s
Datenrate MS	4 x 240 Mbit/s
Pixelabstand PAN	8,75 µm
Pixelabstand MS	2 x 17,5 µm
Anti Blooming	ja
Bereich der Betriebstemperatur	10°-25°C
Länge der Fokalebene	22 cm
Dynamikbereich	14 Bit
PRNU-Korrektur	ja
DSNU-Korrektur	ja
SNR-PAN	>200
SNR MS	>200
Orbit	685 km
Fokallänge	8,6 m
F-Number	12
Bandbreite PAN	450 nm-900 nm
Bandbreite NIR	760 nm-900 nm
Bandbreite Rot	630 nm-690 nm
Bandbreite Grün	520 nm-600 nm
Bandbreite Blau	450 nm-520 nm
Versorgungsspannung	28 VDC
Leistungsaufnahme	<200 W

Modular Functional Camera Head [MFC]

Die technologische Entwicklung des MFC überzeugt durch konsequente Ausnutzung neuester Technologien. Für die Modularität wurden RGB-CCD-Zeilen der Firma Kodak gewählt, die sowohl von Ihren Gehäuseparametern als auch von ihrer Pinbelegung her kompatibel sind. Das MFC-Zeilenmodul besteht, wie aus Abbildung 5 ersichtlich, aus der CCD-Zeile, einer Strukturkeramik, die gleichzeitig das thermale Interface darstellt, und der kompletten

AD-Elektronik inklusive der PRNU- und DSNU-Korrektur sowie einer an die Spektralkanäle angepassten Datenkompression. Abbildung 6 zeigt den gesamten Kamerakopf, der gleichzeitig den Massenspeicher und alle notwendigen Ein- und Ausgabeschnittstellen besitzt.

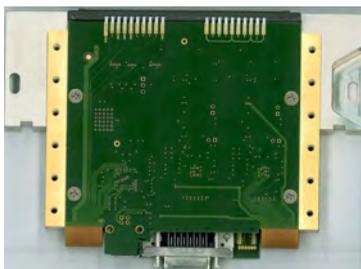


Abb. 5: MFC Zeilenmodul



Abb. 6: Kamerakopf

Das jeweilige Zeilenmodul besitzt als USB2-Interface ein hinreichend schnelles Ausgangsdateninterface. Tabelle 3 beschreibt die Spezifikation des MFC-Systems.

Tab. 3 Spezifikation des MFC-Systems

Pixelanzahl	6 k, 8 k, 10 k, 14 k
Anzahl der CCD-Zeilen	1...5
Radiometrische Dynamik	14 Bit
Datenformat	RAW/JPEG
PRNU-Korrektur	ja
DSNU-Korrektur	ja
Fokallänge	100 mm
F-Number	4
Max. Datenrate pro CCD-Zeile	3 x 10 MPixel/s
Tyoische Integrationszeit	2 ms
Stromversorgung	28 VDC/2 A
Weight (3-Zeilen-MFC)	15kg
Externes IMU-Interface	SYNC IN/OUT
Dateninterface	Fast Ethernet
Operator-Interface	LAN/VGA & KEY & Mouse

Hybrid-Technologie

Eine der interessantesten Sensorentwicklungen stellt die Hybrid-Technologie (FAIRCHILD IMAGING 2005) dar. Mithilfe dieser Technologie wurden die rauscharme CCD-Technologie und die Flexibilität der CMOS Technologie miteinander kombiniert. Die benutzte CCD-Technologie wird hierbei als Backside-thinned-Technologie ausgeführt und auf dem CMOS-Substrat wird die komplette A/D-Signalverarbeitung aufgebaut. Abbildung 7 zeigt eine mögliche Umsetzung.

Das Potential derartiger Entwicklungen liegt eindeutig in der Integration von Verarbeitungsalgorithmen innerhalb der CMOS-Technologie. Die Quanteneffizienzerhöhung bei 400 nm auf 80 % und die Reduzierung der RMS-Elektronen steigern die Flexibilität der Technologie.

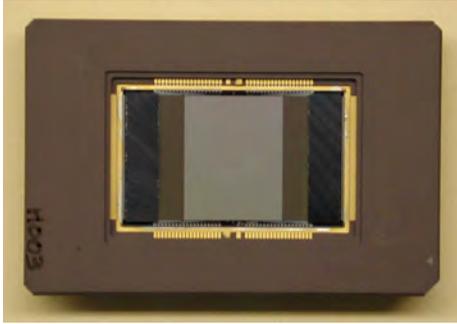


Abb. 7: Sensor in Hybridtechnologie der Firma Fairchild Imaging

Zusammenfassung und Ausblick

Die Einrichtung Optische Informationssysteme des DLR wird sich auf Grund der expandierenden Nachfrage nach TDI-Sensorsystemen systemtheoretisch mit den Fragestellungen tatsächliche Auflösung, Synchronisation, Rauschen und deren Verifikation und Kalibration beschäftigen.

Zu den in dem Beitrag vorgestellten und experimentell erprobten Technologien lässt sich bemerken, dass die hybride Anordnung von CCD- und CMOS-Technologie die Sensortechnologie mit den größten Erfolgsaussichten ist. Diese Technologie wird in verschiedenen Projekten innerhalb der Einrichtung Optische Informationssysteme getestet und verifiziert. Über die Ergebnisse wird in zukünftigen Beiträgen für DGPF-Tagungen berichtet werden.

Das MFC-Projekt stellt eindrucksvoll unter Beweis, in welchem Maße heute verfügbare Technologien Projekte beeinflussen können. Ein derartiges MFC-Modul mit Objektiv, Pelletierkühlung und Laptop entspricht einem operationellen photogrammetrischen System. Diese Technologie, die das Potential in sich birgt, zu einer erheblichen Verringerung der Investitionskosten zukünftiger Kamerasysteme beizutragen, wird im DLR exemplarisch operationell betrieben, um ebenfalls vollautomatisierte Softwarealgorithmen zu testen. Die Ergebnisse werden in der Präsentation und in zukünftigen Veröffentlichungen dargestellt. Inhaltlich sind Zeilenkamerasysteme mit fünf RGB-Zeilen (15 einzelne) von großem Interesse.

Literatur

- ECKARDT, A., ARNOLD G., LORENZ, E., JAHN, H., OERTEL, D. & BÖRNER, A., 2004: Advanced sensors for surveying and mapping. - Proc. SPIE, **5612**, Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications; Ronald G. Driggers, David A. Huckridge; Eds.: S. 172-179,
- SCHEIBE, K., KORSITZKY, H., REULKE, R., SCHEELE, M., & SOLBRIG, M., 2001: EYESCAN – A High Resolution Digital Panoramic, Camera. - Lecture Notes in Computer Science, Proceeding New Zealand: S. 77-83

- REULKE, R.; SCHEELE, M.; SCHEIBE, K. POSPIS, M., ASPELMEIER, A. & STRACKENBROCK, B., (2001): Multi-Sensor-Ansätze in der Nahbereichsphotogrammetrie. - Publikationen der DGPF, **10**, Photogrammetrie und Fernerkundung - Geoinformation: Geodaten schaffen Verbindungen, 21. Jahrestagung der DGPF und 18. Nutzerseminar des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums, Dreiländertagung gemeinsam mit SGPF und ÖVG, Konstanz: S. 527-531
- REULKE, R., (2003): Design and Application of High-Resolution Imaging Systems. - GIS Geo-Informationssysteme, **3**: S. 30-37
- ECKARDT, A., 2002: Design und Verifikation der ersten digitalen kommerziellen Luftbildkamera, Dissertation, TU-Berlin, 10.10.2002

Praktische Erfahrungen mit dem digitalen Bildflugsystem PFIFF und einer Rollei AIC-45 CIR

Görres Grenzdörffer¹

Zusammenfassung: PFIFF, ein digitales „low-cost“ Fernerkundungssystem der Universität Rostock ist seit letztem Jahr mit einer Rollei AIC 45-CIR Kamera ausgestattet. Darüber hinaus ist das System technisch weiter entwickelt worden, um eine automatische Bildauslösung innerhalb eines Gebiets zu ermöglichen. Die digitale CIR-Kamera weist im Gegensatz zu ihrem analogen Pendant einige Besonderheiten auf, z.B. ist der Sensor im infraroten Bereich sehr lichtsensitiv und herkömmliche Objektive zeigen eine deutliche chromatische Abberation, die zu Unschärfen im IR-Bereich führen. Stereoschrägaufnahmen und die Erkennung von Wildtierspuren sind nur zwei Beispiele innovativer Anwendungen von PFIFF.

1. Einleitung

Das digitale low-cost Fernerkundungssystem PFIFF, das in den vergangenen Jahren vom Autor an der Universität Rostock entwickelt wurde (GRENZDÖRFFER, 2002, GRENZDÖRFFER, 2004), wurde in 2005 mit einer neuen Kamera ausgestattet und in diesem Jahr im Bereich der Bildflugnavigation und Auslösesteuerung weiter entwickelt. Das Herzstücks des Systems bildet die Kamera, eine Rollei AIC-45 CIR, sie hat eine Auflösung von 5440 * 4080 Pixel (22 Megapixel). Für weitere technische Details siehe Tab. 1.

Tab. 1: Technische Spezifikationen der Rollei AIC 45-CIR

Kameratyp	Rollei AIC 45-CIR
Auflösung	5440 * 4080 Pixel
Pixelgröße	9 µm * 9 µm
Sensorgöße [mm]	48.96* 36.72
Farbtiefe pro Kanal	12 Bit
Farbmodus	RGB oder CIR
Min. Bildfolgezeit	ca. 2.5 sec.
Gewicht (inkl. Optik)	ca. 1,500 g
Datentransfer	Firewire, Barebone PC
Software	Phase One 3.1.1

Die Kamera ist in der Lage wahlweise in RGB oder CIR aufzunehmen. Dazu wurde werkseitig der IR-Sperrfilter auf dem CCD-Sensor, der die Farbinformationen über einen Bayer-Filter erfasst, entfernt. Über einen entsprechende Bandfilter, der das blaue Licht herausfiltert (< 520 nm) und vor das Objektiv montiert wird, kommt grünes, rotes und infrarotes Licht bis zu einer Wellenlänge von 1.050 nm auf den Sensor. Im Ergebnis trifft auf den einzelnen roten und grünen CCD-Elementen auch infrarotes Licht, dessen Anteile bei der Entwicklung der Aufnahmen wieder abgetrennt werden müssen. Die Sensitivität des CCD-Sensors ist im infraroten Licht allerdings deutlich stärker als im sichtbaren Licht. Bei der Aufnahme eines wohl ausgeleuchteten Objekts im RGB-Modus muss der Lichteinfall im CIR-Modus um drei Blendenstufen verringert werden, um die gleiche Ausleuchtung zu erreichen. Das führt in der

¹ Universität Rostock, Institut für Management ländlicher Räume, Professur für Geodäsie und Geoinformatik, J.-v.-Liebig Weg 6, 18051 Rostock, email: goerres.grenzdorffer@uni-rostock.de

Konsequenz dazu, dass in den CIR-Aufnahmen die grünen und roten Wellenlängenanteile eher unterrepräsentiert sind, bzw. ein Grau – (Infra)rot Bild entsteht. Abb. 1 zeigt einen Vergleich einer CIR-Aufnahme mit einer kombinierten RG(B) und IR Aufnahme mit einem Filter > 780 nm, die bei einem Testflug am 7.10.2005 kurz nacheinander aufgenommen wurden.



Abb. 1: Vergleich RGB, CIR und kombinierte Aufnahme aus Grün-, Rot und IR-Kanal, Datum 07.10.2005, GSD 15 cm

Die Bilddaten werden nach der Belichtung in einem internen Format gespeichert und dabei geringfügig komprimiert. Während im RGB-Modus noch keine Moiré-Effekte aufgetreten sind, konnten diese bei der Aufnahme landwirtschaftlicher Felder mit der CIR-Belegung der Farbkanäle vereinzelt beobachtet werden, siehe Abb. 2.

Im CIR-Fall sind die Linsen des Objektivs nicht darauf ausgelegt die unterschiedlichen Lichtanteile mit ihren verschiedenen Wellenlängen auf einer Ebene zu fokussieren. Dem sog. Farbblängsfehler (= Chromatische Abberation) liegt zugrunde, dass der Brechungsindex einer Linse von der Wellenlänge des einfallenden Lichts abhängt, so werden wie bei einem Prisma kürzere Wellenlängen des Lichts (blaues Licht) stärker gebrochen als längere Wellenlängen (IR-Licht). Durch zusammengesetzte Linsen eines Objektivs aus verschiedenen Gläsern wird dieser Fehler i.d.R. für das sichtbare Licht korrigiert. Die chromatische Abberation führt dazu, dass CIR-Bilder eine gewisse Unschärfe aufweisen und dass die innere Orientierung kanalbezogene Unterschiede aufweist. In Abb. 3 ist ein Vergleich der Bildscharfe dargestellt, bei dem ein scharf abgebildeter Siemensstern im RGB-Modus verschiedenen Filterkombinationen gegenüber gestellt wurde.



Abb. 2: Moiré Effekt landwirtschaftlicher Felder bei CIR-Aufnahme

Bei der inneren Orientierung führt die chromatische Abberation hauptsächlich zu einer Verlängerung der Brennweite. Allerdings verändert sich auch die Hauptpunktlage (= Farbquerfehler). Die Radialverzeichnung hingegen ist im RGB und im CIR-Modus nahezu identisch, siehe Tab. 2.

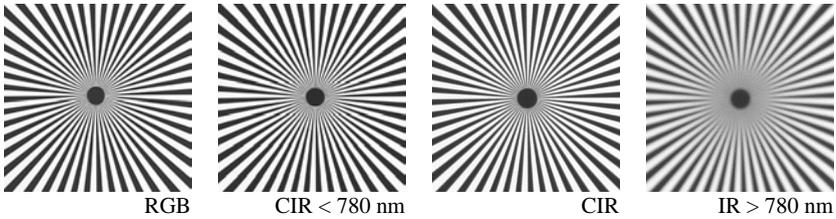
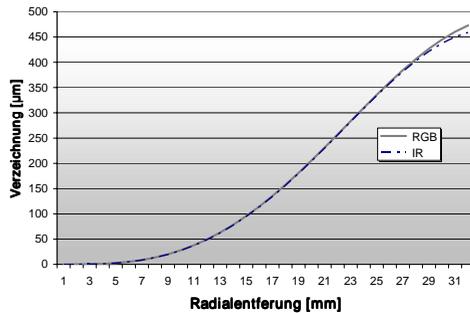


Abb. 3: Einfluss der chromatischen Abberation auf die Bildschärfe

Die starke chromatische Abberation führt in der Praxis dazu, einen Kompromiss in Form einer hyperfokalen Entfernungseinstellung zu wählen, um sowohl die stark IR-reflektierenden Objekte (Vegetation, Bäume) als auch andere Objekte (Straßen, Häuser) hinreichend scharf abzubilden.

Tab. 2: Einfluss der chromatischen Abberation auf die Innere Orientierung eines Distagon 4/40 mm Objektivs

	RGB	IR
c	41.088	41.184
x_h	0.175	0.1564
y_h	0.133	0.1580



Das minimale Auslöseintervall der Kamera bestimmt die maximal mögliche Bodenauflösung. Es hängt maßgeblich von der verwendeten Hardware bzw. der Schreibgeschwindigkeit der Festplatten ab. Unter Laborbedingungen dauert ein Aufnahmezyklus mit einem 3 GHz Rechner und SATA-Festplatten ca. 2.5 s. Unter Bildflugbedingungen, in denen Flugzeugvibrationen die Festplattenzugriffe verlangsamen dauert ein Aufnahmezyklus 3.2 – 3.6 s, so dass unter Bildflugbedingungen ein minimales Auslöseintervall 4 s gilt. Daraus ergibt sich für eine photogrammetrische Befliegung (60 % Längsüberlappung), bei Fluggeschwindigkeiten von ca. 40 m/s eine minimale Bodenauflösung von etwa 10 cm.

2. Erweiterungen PFIFF 2006

Andere wichtige Komponenten von PFIFF sind das GPS-gestützte Flug-Management-System und der Navigationsrechner, der die automatische Auslösesteuerung der Kamera übernimmt. Gleichzeitig werden die Auslöseverzögerung bestimmt und Näherungswerte der äußeren Orientierung aufgezeichnet. Die Auslösesteuerung ist mit dem PPS-Signal des GPS gekoppelt, um eine hochgenaue zeitliche Synchronisation mit dem externen geodätischen L1/L2-GPS-Empfänger zu gewährleisten. Für einen Photoflug wird das System temporär in eine Cessna 172 mit einer kleinen Bodenluke von ca. 12 cm Durchmesser eingebaut. Um zukünftig beim Bildflug die Aufgaben des Copiloten und des Kameraoperators in einer Person vereinen zu

können, mussten die Bereiche Navigation und Kamerasteuerung verbessert und automatisiert werden. Somit ergibt sich die folgende aktuelle Systemskizze für PFIFF, siehe Abb. 4

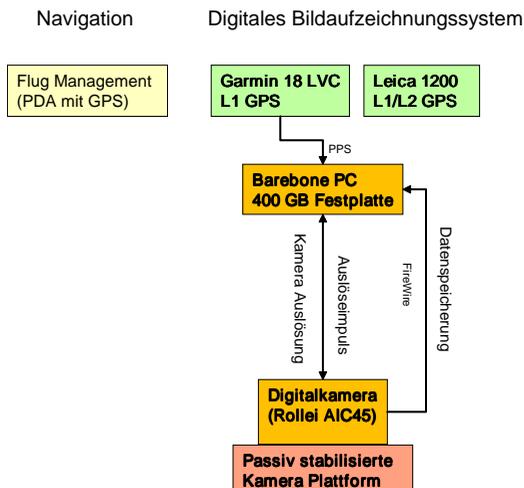


Abb. 4: Das digitale Bildflugsystem PFIFF, 2006

Grundlage der Bildflughavigation bildete bisher die Software CartaLinX, mit der die Flugstreifen und die tatsächliche Flugroute auf einem Laptop dargestellt wurden. Nachteilig war einerseits, dass die Flugroute immer nordorientiert dargestellt wurden, was für den Piloten ein ständiges Umdenken bei den Lenkbewegungen bedeutet und andererseits fehlten für den Piloten wichtige Informationen für die Navigation (aktueller Kurs ↔ Sollkurs, kritische Geschwindigkeit etc.). Aus diesen Gründen heraus wurde eine neue eigene Softwarelösung entwickelt, die auf einem PDA lauffähig ist, den Piloten mit wichtigen Informationen zum Bildflug versorgt und darüber hinaus noch einfach von ihm zu bedienen ist. Die wichtigsten Funktionen der Software sind: Rotation der Graphik in Flugrichtung, automatische Zoomfunktion innerhalb und außerhalb des Bildfluggebiets, graphische Darstellung der Bildfolgezeit und die Ausgabe der Flugroute als Textstring bzw. im Shape-Format.

Bei hochauflösenden Bildflügen mit Bodenauflösungen von 10 – 15 cm muss der Pilot wissen, ob die minimale Bildfolgezeit Δt der Kamera unterschritten wird. Diese wird mit der nachfolgenden Formel berechnet:

$$\Delta t = \frac{s' \cdot h_g}{v_g \cdot c} \cdot \left(1 - \frac{p}{100}\right)$$

wobei s' = Größe des Bildes bzw. CCD-Chips
 v_g = Flugeschwindigkeit über Grund
 h_g = Höhe über Grund
 c = Kammerkonstante
 p = Längsüberlappung in %

Die Größe des CCD-Chips und die Kammerkonstante stehen fest. Weiterhin ist eine Längsüberlappung bei photogrammetrischen Bildflügen mit 60% fix. Als verbleibende Variablen

wird die Fluggeschwindigkeit über Grund v_g und die ellipsoidische Höhe näherungsweise aus dem GPS (GGA-String) ermittelt. Um auf die Höhe über Grund h_g zu kommen, muss im voraus eine mittlere Geländehöhe, unter der Berücksichtigung der durchschnittlichen Geoidundulation vom WGS 84-Ellipsoid, eingegeben werden. Das kritische Δt der AIC 45 liegt unter Bildflugbedingungen bei 4 Sekunden. Bei Unterschreitungen wird das dem Piloten mit einem roten Bildhintergrund signalisiert. Bei Werten zwischen 4 und 6 Sekunden bekommt der Pilot ein gelbes Signal. Bei $\Delta t > 6$ Sekunden bleibt der Bildhintergrund grün. Umgesetzt wurde die Softwareentwicklung mit den GPS-Tools der Firma Franson S/A.

Die Auslösesteuerung und Eventregistrierung der Kamera erfolgte seit 1999 durch einen separaten Rechner. Für systematische Aufnahmen wird dabei zu Beginn eines Flugstreifens die automatische Triggerung gestartet, während des Streifens wird die Bildfolgezeit nach der obigen Formel laufend berechnet und die Kamera synchron zum PPS-Signal des GPS ausgelöst. Damit ist eine konstante Überlappung bei maximaler Flexibilität in der Durchführung eines Bildflugs gewährleistet. Dieser Ansatz unterscheidet sich von dem herkömmlichen Ansatz des photogrammetrischen Bildflugs, bei dem üblicher weise die Bildmittelpunkte vorab während der Bildflugplanung festgelegt und systematisch abgefliegen werden.

Durch die lange Auslöseverzögerung von 302 ms (± 0.1 ms) der AIC 45 muss im Rahmen des Postprocessings eine Interpolation der aufgezeichneten GPS-Positionen auf den Auslösezeitpunkt vorgenommen werden. Diese kann allerdings aufgrund von Flugzeugbewegungen mit einem signifikanten Fehler behaftet sein. Ein Vergleich zwischen linear interpolierten GPS-Projektionszentren und Projektionszentren, die mit einem GPS/INS ermittelt wurden zeigen dies in Tab. 3 deutlich.

Tab. 3: Abweichungen [m] der Projektionszentren mit GPS und GPS/INS berechnet (n = 266)

	X	Y ¹	Z
Mittelwert	0.004	0.009	0.015
Stabw.	0.077	0.104	0.051
Max	0.243	0.581	0.140
Min	-0.175	-0.546	-0.131

¹ Hauptflugrichtung der Bildstreifen

Bei der Neuentwicklung der Auslösesteuerung wurde deshalb die Auslöseverzögerung bei der PPS-synchronen Auslösung berücksichtigt, siehe Abb. 5.

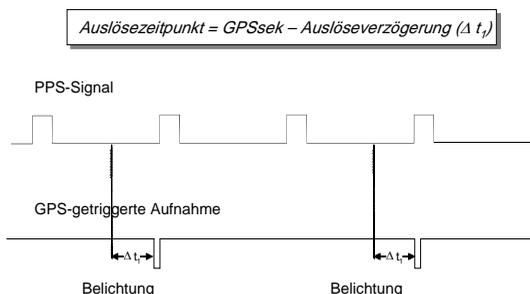


Abb. 5: PPS-Synchrone Bildaufnahme unter Berücksichtigung der Auslöseverzögerung

Um Aufnahmen innerhalb des Bildfluggebiets vollautomatisch auszulösen wird die Auslösesteuerung mit der Flugnavigation gekoppelt. Dabei wird von der Flugnavigationsoftware beim Eintritt in das Bildfluggebiet / Flugstreifen die GPS-gestützte Bildauslösung automatisch gestartet. Nach Beendigung des Flugstreifens wird die automatische Bildauslösung gestoppt. Da das Windows Betriebssystem nicht Echtzeitfähig ist, ist eine zusätzliche Timerkarte NI-6601 von National Instruments in den Rechner integriert worden. Die Programmierung der Timerkarte und die PPS-synchrone Auslösung wurde mit Labview 8 realisiert.

3. Projektbeispiele

Im folgenden Kapitel sollen zwei aktuelle Projekte kurz vorgestellt werden, die die besonderen Vorzüge des digitalen „low cost“ Systems – kleine Gebiete, kurzer Turn-around Zeitraum und nahezu passpunktlose Georeferenzierung sowie die Kombinationsmöglichkeit von Schräg- und Senkrechtaufnahmen – ausnützen.

3. 1 Direkte Orientierung - Kombination von Senkrecht- und Schrägaufnahmen, Beispiel Potsdam

Ein großer Vorteil von PFIFF ist dessen Flexibilität, die eine Kombination von Schräg- und Senkrechtaufnahmen erlaubt. Diese Kombination ist beispielsweise für die gleichzeitige Aufnahme des Grundrisses und der Fassaden zur Erstellung von 3D-Stadtmodellen von großem Interesse. Bei der Flugplanung von Schrägaufnahmen sind mehrere Besonderheiten zu berücksichtigen. Der Bildmaßstab ist nicht einheitlich, bzw. er nimmt mit zunehmender Entfernung zum Flugzeug zu. Aufgrund der komplexeren Aufnahmegeometrie von Schrägaufnahmen ist eine indirekte Orientierung schwierig. Deshalb ist eine direkte Orientierung mit einem GPS/INS sinnvoll. Um aus Schrägaufnahmen systematisch 3D-Informationen abzuleiten, können 3D-Stereoschrägaufnahmen realisiert werden. Grundsätzlich gelten für Stereoschrägaufnahmen dieselben Aufnahmeregeln wie für Stereosenkrechtaufnahmen, d.h. die Objekte müssen aus einer Ebene heraus unter verschiedenen Blickwinkeln aufgenommen werden.

Der Bildflug eines Teils von Potsdam erfolgte am 6.10.2005. Zusätzlich wurde bei dem Bildflug ein GPS/INS System Applanix 410 des DLR eingesetzt. Die Flughöhe betrug ca. 730 m. Die Querüberlappung betrug ca. 40 %, um eine vollständige Bildaufzeichnung, auch bei böigen Witterungsverhältnissen garantieren zu können. Anschließend an die Senkrechtaufnahmen wurden 76 Schrägaufnahmen aus einer Flughöhe von ca. 500 m quadratisch um das Untersuchungsgebiet herum aufgenommen. Aufgrund des Sonnenstands entstanden Mit- und Gegenlicht Aufnahmen, die unterschiedlich gut auswertbar sind.

Im Rahmen einer integrierten Sensororientierung wurden mit dem Softwaremodul CalQS der POSpac-Software von Applanix die Boresitewinkel bestimmt. Grundlage war ein Block, bestehend aus 5 Streifen mit insgesamt 142 Bildern. Die Genauigkeit der Boresite Winkel Bestimmung betrug 0.004° in ω , 0.005° in φ und 0.010° in κ . Damit konnten der Block und andere Bilder, die im Rahmen des Projekts geflogen wurden Subpixelgenau georeferenziert werden. Die Orientierung der Schrägbilder erwies sich als schwieriger, da eine Neuinitialisierung des GPS/INS notwendig war. Nichtsdestotrotz waren die Aufnahmen problemlos in Stereo auswertbar, siehe Abb. 6. Durch die ungewohnte Stereogeometrie und den teilweise großen Parallaxen muss sich der Betrachter in der Regel erst ein wenig in das Bild einarbeiten, bis der Stereoeindruck voll wirkt.



Abb. 6: Anaglyphenbild einer Stereoschraugaufnahme, Aufnahmedatum 06.10.2005

3. 2 Erfassung von Wildtierspuren in der Umgebung von Grünbrücken

Die Effizienz von Wildtierbrücken ist nicht nur von ihrer Dimensionierung, Gestaltung und Begrünung abhängig, sondern auch von ihrer Einbindung in die umgebende Landschaft. Darum ist es nicht nur wichtig, welche Tierarten das Bauwerk queren, sondern wie sie sich ihm nähern und auf welchem Weg sie es verlassen. Konventionelle Monitoringansätze, die ausschließlich auf einer terrestrischen Erhebung und Begehung des Umfeldes von Wildtierpassagen beruhen, haben immer die Nachteile, dass sie arbeitsintensiv und damit teuer sind. Zudem ist eine wirklich flächendeckende Erfassung nicht möglich, da das Gelände im Umfeld des Bauwerkes nur stichprobenartig entlang von Transekten begangen werden kann. Luftaufnahmen können flächendeckend Bewegungskorridore erkennen und für überprüfende und/oder untersetzende Vorortbegehungen eine punktgenaue Orientierung im Gelände liefern. International sind Luftbilder in den letzten Jahren und Jahrzehnten oftmals zur Zählung von Wildtieren eingesetzt worden, z.B. KINGSFORD, 1999. Dabei wurden verschiedenste Sensoren eingesetzt, z.B. Luftbilder, Video, Thermalkamera, ANTHONY, 1995, GREGORY, 2005.

Wildspuren können nicht zu jeder Jahreszeit und auf allen Oberflächen bzw. Landnutzungen gleich gut in hochauflösenden Luftbildern mit Bodenauflösungen von 5 – 15 cm erkannt werden. Grundvoraussetzung für eine luftbildgestützte Erkennung und Erfassung ist, dass die Spuren von einem oder mehreren Tieren „Abdrücke“ in der Natur hinterlassen. Das können

die Huf- oder Tritts Spuren von Tieren auf Acker- oder Schneeflächen sein, wobei nur die großen Säugetiere, wie z.B. Rot-, Dam-, Reh-, und Schwarzwild luftbildsichtbare Spuren hinterlassen, oder auch die Spuren in der Vegetation, wie z.B. niedergedrücktes Gras, Spuren in reifem Getreide oder Korridore in krautiger Vegetation. In frischem Gras und vegetationsbestandenen Ackerflächen, auf gemähten und frisch geernteten Flächen sowie auf Wegen und Gräben sind hingegen keine Wildspuren erkennbar. Im Jahresverlauf ergeben sich deshalb bestimmte Zeitfenster. Abb. 7 zeigt ein Beispiel einer „Abreifeaufnahme“ vom 18.8.2005.



Abb. 7: Wildtierspuren und Trittsteinbiotope in der Umgebung der Grünbrücke Vietow

4. Zusammenfassung

Das System PFIFF hat in den letzten 6 Jahren bei ca. 100 Befliegungen seine vielfältigen Einsatzmöglichkeiten unter Beweis gestellt. Mit der CIR-fähigen Kamera sind neue Anwendungsoptionen hinzugekommen. Allerdings müssen im CIR-Modus besondere Eigenschaften der Kamera berücksichtigt werden. Schrägaufnahmen, die durch ein GPS/INS effizient und genau orientiert werden können, werden zukünftig eine größere Bedeutung in der Aerophotogrammetrie bekommen, da sie auch von ungeübten Nutzern einfach zu interpretieren sind.

5. Literatur

- ANTHONY, R.M, ANDERSON, W.H., SEDINGER, J.S. & McDONALD, L.L. (1995): Estimating populations of nesting brant using aerial videography. *Wildlife Society Bulletin* 23:80-87.
- GREGORY, S. K. (2005): Comparison of density estimators for white-tailed deer using aerial thermal infrared videography.- 126 S. University of Arkansas – Monticello (=http://www.afrc.uamont.edu/kissellr/GregoryThesis.pdf)
- GRENDÖRFFER, G. (2002): Konzeption, Entwicklung und Erprobung eines digitalen integrierten flugzeuggetragenen Fernerkundungssystems für Precision Farming (PFIFF).- Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C: Vol. **552**: 142 S.
- GRENDÖRFFER, G. (2004): Das digitale flugzeuggetragene Low-Cost Fernerkundungssystem PFIFF.- PFG Heft 3/2004.- S. 189 – 200.
- KINGSFORD, R.T. (1999): Aerial survey of waterbirds on wetlands as a measure of river and floodplain health. *Freshwater Biology* 41:425-438.

Erstellung eines Höhenmodells aus einem OrbView-3 Stereopaar

KARSTEN JACOBSEN

Zusammenfassung: Hochauflösende OrbView-3 Weltraumaufnahmen, mit einem Objektpixelabstand von 1m, ermöglichen die Erstellung von Orthofotos bis zum Ausgabemaßstab 1 : 8000. Hierfür sind entsprechend detaillierte Höhen- oder Stadtmodelle erforderlich. Sie lassen sich aus Stereopaaren vom gleichen Sensor erstellen.

Ein OrbView-3 Stereobildpaar des Bereiches um die Stadt Zonguldak, Türkei, das vom gleichen Orbit stammt, wurde detailliert untersucht. Die Bildorientierung ist auf eine Standardabweichung von etwa 1,3m beschränkt. Zum einen war die Passpunktidentifizierung in den OrbView-3 Aufnahmen schwieriger, zum anderen ist die innere Genauigkeit offensichtlich etwas schlechter. Die etwas schlechtere Bildqualität kann auf die Überlappung benachbarter Pixel um 50% zurückgeführt werden – die Objektpixelgröße beträgt 2m, der Abstand benachbarter Objektpixelzentren aber nur 1m.

Das Höhen-Basisverhältnis des vorhandenen OrbView-3-Bildpaares beträgt 1,4. Nach einfacher Theorie gewährleistet dieses eine gute Höhengenaugigkeit. Eine automatische Bildzuordnung in Stadtbereichen ist aber etwas problematisch – ein Gebäude wird auf der einen Aufnahme mit dem Dach und der nördlichen Fassade, auf dem anderen mit dem Dach und der südlichen Fassade abgebildet. Dieses führt zu Zuordnungsproblemen im Stadtbereich. Für offenes Gelände ist der große Konvergenzwinkel zwischen den Aufnahmerichtungen von Vorteil, nicht jedoch im Waldgebiet. Mit einem deutlich kleineren Konvergenzwinkel konnten mit IKONOS-Aufnahmen besonders im Innenstadtbereich bessere Ergebnisse erzielt werden. Dagegen ist für manuelle Stereoauswertungen ein kleineres Höhen-Basisverhältnis (größerer Konvergenzwinkel) von Vorteil.

1 Einführung

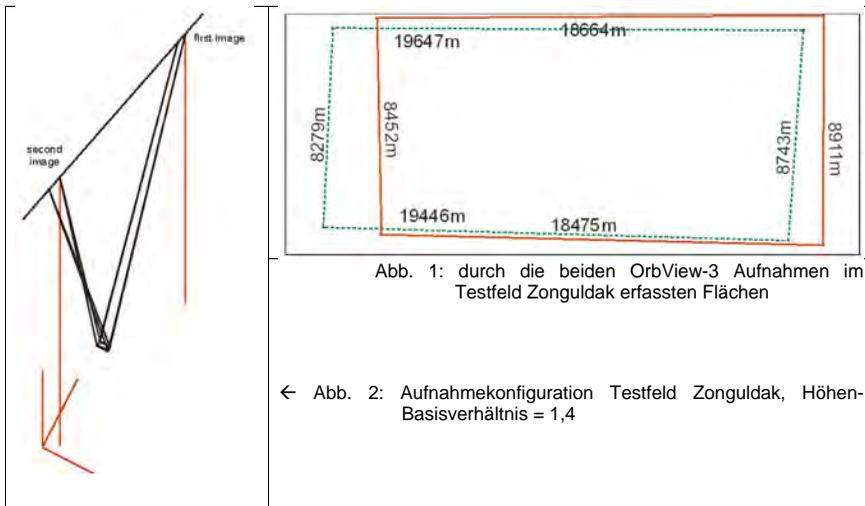
SRTM-Höhenmodelle stehen nahezu weltweit kostenlos zur Verfügung, sie sind jedoch mit einer Rasterweite von 3 Bogensekunden, entsprechend 92m am Äquator, und der durchgeführten Mittelbildung nicht sehr detailliert und weisen besonders im Gebirge Lücken auf. Diese Lücken sind zwar in der Zwischenzeit aufgefüllt worden, allerdings mit teilweise sehr ungenauen Daten, was zu der unangenehmen Situation einer teilweise unbekanntem Genauigkeit führt. Aus diesen Gründen besteht nach wie vor ein Bedarf an hoch aufgelösten Höhenmodellen mit ausreichender und bekannter Genauigkeit.

Von den sehr hoch auflösenden Weltraumsensoren IKONOS und QuickBird gibt es nur eine begrenzte Anzahl von Stereomodellen. Um die Ausrichtung des Satelliten von einem Objekt auf ein 300km entferntes Objekt zu ändern braucht IKONOS 25 sec, QuickBird 62 sec und OrbView-3 31 sec. Mit den kommenden WorldView-1 und -2 wird dieses auf 10 sec bzw. 9sec verkürzt (MCGILL 2005). Besonders für QuickBird ist die Aufnahme eines Stereomodells unwirtschaftlich da die 9-fache Beobachtungszeit wie für eine Einzelszene benötigt wird, der Preis für eine Stereoszene dagegen nur beim 2,3-fachen einer Einzelszene liegt. Trotz der für OrbView-3 nur um den Faktor 2 besseren Voraussetzung werden mit OrbView-3 häufiger Stereoszenen aufgenommen.

Ein OrbView-3 Stereomodell des Testfeldes Zonguldak, Türkei, wurde untersucht. Als Referenz liegt ein mit großmaßstäbigen Luftbildern aufgenommenes Höhenmodell mit einer

Rasterweite von 10m und einer Genauigkeit von etwa 50cm vor. Die Passpunkte wurden durch GPS-Messung bestimmt. Sie führten bei der geometrischen Untersuchung von QuickBird-Aufnahmen zu Genauigkeiten von geringfügig unter 50cm.

2 Orientierung der OrbView-3 Aufnahmen



Die Szenen des OrbView-3 Stereopaars vom Testgebietes Zonguldak wurde vom gleichen Orbit aus mit 40 sec Zeitabstand aufgenommen. Die erste Szene wurde im Objektraum vom Osten nach Westen, die zweite Szene vom Westen nach Osten gescannt (Abbildungen 1 und 2). Sie liegen als „Basic Express“, somit als nur radiometrisch und um die innere Orientierung geometrisch verbesserte Originalbilder vor.

Wie die anderen hoch auflösenden optischen Satellitensensoren bestimmt OrbView-3 die Position durch GPS und die Winkel durch Kreisel, die durch Sternkameras unterstützt werden. Damit ist eine direkte Sensororientierung mit einer Genauigkeit von etwa 10m ohne Verbesserung durch Passpunkte gegeben. Die Orientierungsinformation liegt unter anderem als rationale Polynomkoeffizienten (RPC) vor (siehe auch DIAL & GRODECKI, 2002). Die RPC beschreiben die Bildposition als Funktion der Objektkoordinaten. Eine Berechnung der Objektkoordinaten mit gegebener Höhe kann iterativ erfolgen.

Die Bildorientierung wurde mit den durch Passpunkte verbesserten RPC aber auch zur Kontrolle mit den Näherungsverfahren der direkten linearen Transformation (DLT) und der dreidimensionalen Affintransformation durchgeführt. Die DLT basiert auf dem mathematischen Modell der Zentralprojektion, wobei die innere und die äußere Orientierung gemeinsam mit 8 Unbekannten berechnet werden. Das benutzte mathematische Modell entspricht nicht der Realität – in Orbitrichtung liegt keine Zentralprojektion vor. Wegen der eingeschränkten Aufnahmezeit muss OrbView-3 die Aufnahmezeit durch permanente Rotation vergrößern (Abb. 3).

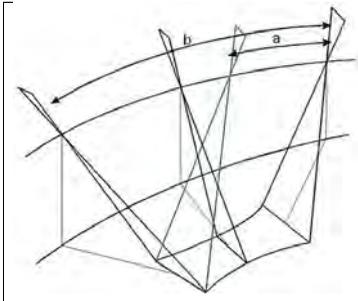


Abb. 3: Vergrößerung der Aufnahmezeit durch permanente Rotation während der Aufnahme

Faktor b/a für OrbView-3 = 1.42

Die 3D-Affintransformation benutzt statt der Zentralprojektion das mathematische Modell der Parallelprojektion, was auch nicht korrekt ist. Aus diesem Grund wurde die 3D-Affintransformation um 4 Terme, die die Änderung der Aufnahmerichtung beschreiben können, erweitert. Dieses ist für die Bilder geeignet, die auf eine Fläche konstanter Höhe projiziert wurden, wie OrbView-3 Standard, QuickBird OR Standard oder IKONOS Geo. Wie Abbildung 1 jedoch zeigt, ist die durch eine Basic-Szene erfasste Fläche kein Rechteck, weswegen die erweiterte Affintransformation noch um 2 weitere Terme für die Orientierung von Originalbildern ergänzt wurde (Formeln 1a – 1c).

$$x_{ij} = a_1 + a_2 * X + a_3 * Y + a_4 * Z$$

$$y_{ij} = a_5 + a_6 * X + a_7 * Y + a_8 * Z$$

Formel 1a: 3D-Affintransformation

$$x_{ij} = a_1 + a_2 * X + a_3 * Y + a_4 * Z + a_9 * X * Z + a_{10} * Y * Z$$

$$y_{ij} = a_5 + a_6 * X + a_7 * Y + a_8 * Z + a_{11} * X * Z + a_{12} * Y * Z$$

Formel 1b: erweiterte 3D-Affintransformation – für nicht-parallele Blickrichtungen

$$x_{ij} = a_1 + a_2 * X + a_3 * Y + a_4 * Z + a_9 * X * Z + a_{10} * Y * Z + a_{13} * X * X$$

$$y_{ij} = a_5 + a_6 * X + a_7 * Y + a_8 * Z + a_{11} * X * Z + a_{12} * Y * Z + a_{14} * X * Y$$

Formel 1c: erweiterte 3D-Affintransformation für Originalszenen

Zuerst wurden die verschiedenen Orientierungsverfahren durch Einzelbildorientierung miteinander verglichen (Abbildung 4). Hierfür ist die Höhe der Pass- und der Vergleichspunkte erforderlich. Die rationalen Polynomkoeffizienten, die mit der Szene mitgeliefert wurden, wurden im Rahmen einer Bias-korrigierten Auswertung benutzt. Ohne Passpunkte ergaben sich Verschiebungen für beide Szenen in der X-Richtung von -3,6m / -7,1m und in der Y-Richtung von -17,0m / 9,0m. Für die Objektpixelgröße von 1m reicht das nicht aus, es war somit eine Verbesserung mittels Passpunkte erforderlich. Die Bias-korrigierte RPC-Auswertung berücksichtigt im ersten Schritt neben der individuellen Blickrichtung die Objektpunkthöhe. Danach erfolgt eine zweidimensionale Transformation auf die Passpunkte. Mit einer einfachen Verschiebung wurden im Quadratmittel beider Szenen und für X und Y bei Verwendung aller Passpunkte 1,93m Widerspruch erzielt, durch eine ebene Affintransformation verbesserte sich das Ergebnis auf 1,30m. Aus diesem Grund wurden die Untersuchungen mit ebener Affintransformation durchgeführt womit für die Bias-korrigierte RPC-Orientierung mindestens 3 Passpunkte erforderlich sind. Auf die Höhenverteilung der Passpunkte muss nicht geachtet werden, da die Aufnahmerichtung durch die RPC vorgegeben ist. Für DLT und die Affintransformation sind mehr und gut

dreidimensional verteilte Passpunkte erforderlich. Wie aus Abbildung 4 ersichtlich, kommt nur die 3D-Affintransformation erweitert für Originalbilder in die Nähe der RPC-Lösung.

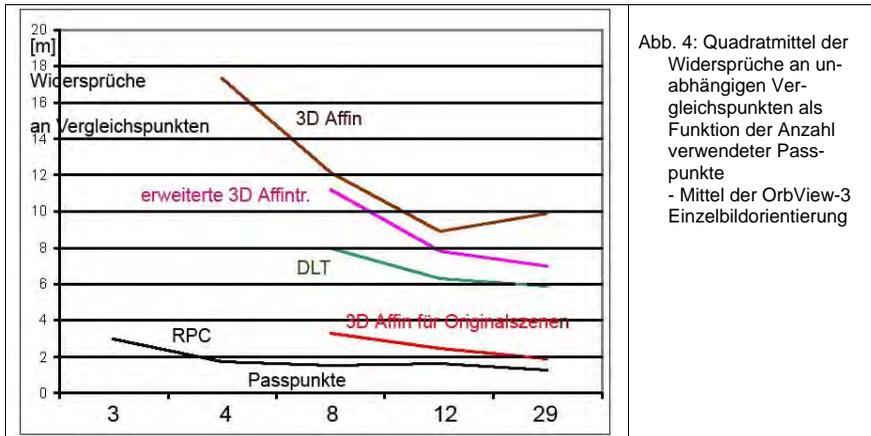


Abb. 4: Quadratmittel der Widersprüche an unabhängigen Vergleichspunkten als Funktion der Anzahl verwendeter Passpunkte - Mittel der OrbView-3 Einzelbildorientierung

Eine dreidimensionale Lösung führte mit allen Passpunkten zu einer Verbesserung von im Quadratmittel 1,26m für X und 1,34m für Y auf 1,00m für X, 1,16m für Y und 1,80m für Z. Das Quadratmittel der Höhenwidersprüche von 1,80m entspricht bei dem Höhen-Basis-Verhältnis von 1,4 einem Quadratmittel der x-Parallaxe von 1,29m. Die etwas besseren Ergebnisse für die Lage als im Falle der Einzelbildorientierung kann durch den Einfluss von ungenauen Höhen oder Höhendefinitionen der Punkte erklärt werden. Insgesamt wurde nicht wie bei IKONOS und QuickBird eine Sub-Pixel-Genauigkeit erreicht. Der Grund hierfür liegt in der etwas schlechteren Bildqualität als bei IKONOS-Aufnahmen gleicher Objektpixelgröße. OrbView-3 verfügt nicht über Transfer-Delay and Integration (TDI) Sensoren, die die Energie durch Verschiebung auf die Nachbarzeile bei gleichzeitig weiterer Belichtung über mehrere Zeilen integrieren können. Stattdessen arbeitet OrbView-3 mit gestaggerten Bildzeilen. Die projizierten Pixelgrößen auf der Erde betragen 2m x 2m, benachbarte Pixel überlappen sich um 50%, damit werden scheinbare Objektpixelgrößen von 1,0m erzielt, die aber nicht die gleiche Bildqualität wie Originalpixel von 1m x 1m haben können.

3 Höhenmodell aus OrbView-3-Aufnahmen

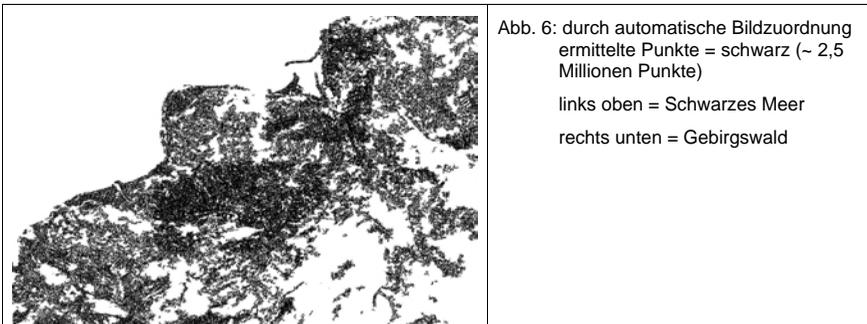
Nach einfacher Theorie hängt die Höhengenaugkeit linear vom Höhen-Basis-Verhältnis ab (Formel 2). Dieses setzt jedoch voraus, dass die Standardabweichung der x-Parallaxe unabhängig vom Höhen-Basis-Verhältnis ist. Für die manuelle Punktmessung kann das bei gutem Objektkontrast und einigermaßen ebenem Gebiet der Fall sein. Für die automatische Bildzuordnung gilt das aber nicht. In steilen Gebieten und besonders in Städten unterscheiden sich die Bilder eines Stereomodells erheblich – die korrespondierenden Aufnahmen können vom selben Gebäude unterschiedliche Seiten abbilden, wie in Abbildung 5 dargestellt.

$$SZ = \frac{h}{b} \cdot Spx \quad \text{Formel 2: Objekthöhengenaugkeit SZ} \quad h = \text{Aufnahmehöhe} \quad b = \text{Basis}$$

Spx = Standardabweichung der x-Parallaxe [Objektpixelgröße]



Ähnliche Probleme haben sich auch im Wald ergeben, die Wipfel werden von deutlich unterschiedlicher Richtung aus abgebildet, womit eine automatische Bildzuordnung von Waldgebieten fast unmöglich ist. Hinzu kommt, dass das Testgebiet Zonguldak extrem bewegt ist. Selbst in der Innenstadt sind steile bis senkrechte Partien keine Ausnahme. Aus dem Referenzhöhenmodell ergibt sich eine durchschnittliche Geländeneigung von 15° , aber auch die für die Höhenmodellerstellung noch wichtigere Änderung der Geländeneigung von einer Rasterweite zur nächsten beträgt ebenfalls 15° .



Dementsprechend wurde durch automatische Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate im Durchschnitt nur etwa 43% aller möglichen Punkte mit einem Korrelationskoeffizienten von mindestens 0,6 akzeptiert. Wie Abbildung 6 zeigt, ist die Punktverteilung sehr unterschiedlich. Die automatische Bildzuordnung versagte fast vollständig in dem Gebirgswald, Probleme ergaben sich aber auch in der Innenstadt und hier besonders in den steileren Lagen, die Geländeneigungen bis zu über 50% haben. Dagegen sind die Ergebnisse in den flacheren und offenen Gebieten akzeptabel.

Von einem großen Teil des Testgebietes sind Referenzhöhen mit einer Rasterweite von 10m aus einer großmaßstäbigen Luftbildauswertung vorhanden. Das aus dem OrbView-3 Stereomodell erstellte Höhenmodell wurde mit diesem Referenzhöhenmodell verglichen. Vor der Analyse erfolgte eine Überprüfung der Übereinstimmung der horizontalen Lage beider Höhenmodelle, die durch das nicht sehr genau bekannte türkische Datum nicht selbstverständlich war. Das Datumsproblem wurde durch Verschiebung des Referenzhöhenmodells auf das ED50, das der OrbView-3-Orientierung zugrunde liegt, mittels des hannoverschen Programms DEMSHIFT gelöst. Durch Ausgleichung ergab sich

eine Verschiebung von 19,8m in X- und 150,0m in Y-Richtung. Dadurch wurde das Quadratmittel der Höhenunterschiede von 25,6m auf 7,04m reduziert.

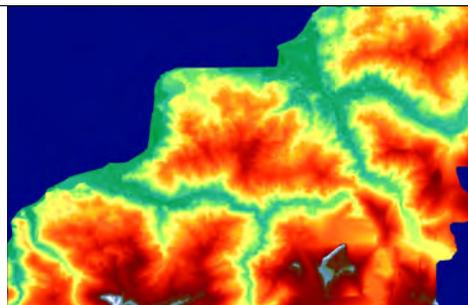


Abb. 7: OrbView-3 Höhenmodell (0m – 400m)

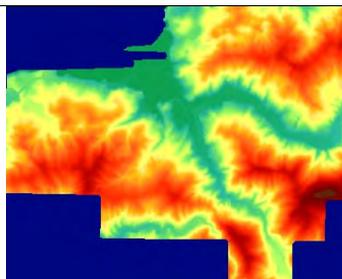


Abb. 8: Referenzhöhenmodell (10 km x 9 km)

Der Vergleich der farbkodierten Darstellung des aus den OrbView-3-Aufnahmen erstellten Höhenmodells mit dem Referenzhöhenmodell ergibt auf den ersten Blick eine gute Übereinstimmung. Im Detail ist das OrbView-3-Höhenmodell deutlich unruhiger und zeigt viele isolierte Erhebungen, bei denen es sich hauptsächlich um Gebäude handelt. Durch die automatische Bildzuordnung wird die sichtbare Oberfläche, also ein digitales Situationsmodell (DSM) und nicht ein digitales Höhenmodell (DHM) erzeugt, welches die Höhe des Erdbodens darstellt. Aus dem DSM kann durch Filterung ein DHM abgeleitet werden.

	Gebiet	SZ	Bias	SZ als $F(\alpha)$	SZ als $F(\alpha)$ ohne Bias
Original-höhenmodell	offen	9,46	-4,54	$6,86 + 11,0 \cdot \tan \alpha$	$5,40 + 12,1 \cdot \tan \alpha$
	Forst	12,31	-5,82	$8,56 + 14,4 \cdot \tan \alpha$	$6,75 + 15,2 \cdot \tan \alpha$
gefiltertes Höhenmodell	offen	8,54	-3,18	$5,13 + 15,6 \cdot \tan \alpha$	$4,37 + 15,7 \cdot \tan \alpha$
	Forst	12,35	-5,22	$8,41 + 15,7 \cdot \tan \alpha$	$7,10 + 15,8 \cdot \tan \alpha$

Tabelle 1: Vergleich des OrbView-3-Höhenmodells mit dem Referenzhöhenmodell
 Werte [m] α = Geländeneigung

Die Genauigkeit des Höhenmodells zeigt, wie üblich, eine lineare Abhängigkeit von der Geländeneigung, weswegen eine Darstellung nach der Koppeschen Formel erforderlich ist. Die Analyse wurde separat für die Waldgebiete und die offenen Gebiete, die überwiegend städtischen Charakter haben, durchgeführt. Das OrbView-3-Höhenmodell zeigt deutliche systematische Fehler (Bias), die im Waldgebiet größer als in den offenen Gebieten sind. Dieses ist auf den Einfluss der Gebäude und der Bäume zurückzuführen. Durch eine Filterung mit dem Hannoverschen Programm RASCOR (PASSINI et al. 2002) verringert sich der systematische Fehler und auch das Quadratmittel der Differenzen in den offenen Gebieten. In den Waldgebieten zeigt sich keine Verbesserung.



Abb. 9: gefiltertes OrbView-3 Höhenmodell, Äquidistanz = 50m

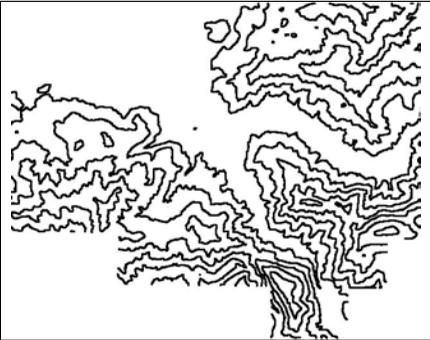


Abb. 10: Referenzhöhenmodell, Äquidistanz = 50m

Trotz Filterung sind in dem OrbView-3-Höhenmodell noch eine Reihe von isolierten Höhenlinien zu sehen. Eine noch stärkere Filterung könnte diese zwar beseitigen, würde aber zu unerwünschten Detailverlusten führen. In den Waldgebieten hilft die Filterung nicht, wenn alle Punkte auf den Bäumen liegen.

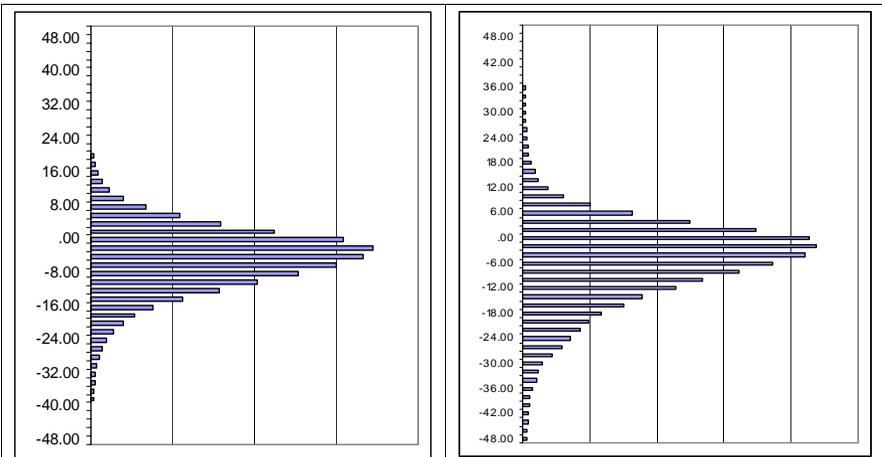


Abb. 11: Häufigkeitsverteilung der Höhenwidersprüche des OrbView-3-Höhenmodells
links: offene Gebiete
rechts: Forst
negative Höhendifferenzen = OrbView-3-Höhenmodell liegt über dem Referenzhöhenmodell

Der starke Einfluss der Objekte auf der Geländeoberfläche zeigt sich klar in der asymmetrischen Häufigkeitsverteilung der Widersprüche (Abbildung 11). Durch die Filterung wird besonders in den offenen Gebieten die Häufigkeitsverteilung etwas symmetrischer, zeigt aber nach wie vor den klaren Einfluss von Objekten oberhalb der Geländeoberfläche (Abbildung 12).

Autorenverzeichnis

ABMAYR, T.: Siehe BÖRNER, A., SUPPA, M., ABMAYR, T., BODENMÜLLER, T., ECKARDT, A., HIRSCHMÜLLER, H., SCHEIBE, K. & STACKENBROCK, B.: Ein modulares Sensorsystem zur multispektralen Erfassung von dreidimensionalen Objekten	319
ALBERTZ, J.: Siehe GEHRKE, S., LEHMANN, H., KÖHRING, R., SCHOLTEN, F., WÄHLISCH, M. & ALBERTZ, J.: Neue topographische Karten der Mars-Oberfläche	83
ALBERTZ, J.: Siehe LEHMANN, H., GEHRKE, S., VAN GASSELT, S., ALBERTZ, J. & NEUKUM, G.: Eine kombinierte topographisch-thematische Karte der Centauri und Hellas Montes (Mars)	109
BÄHR, H.-P. & REHOR, M.: Bildanalyse zur Unterstützung beim Katastrophenmanagement	21
BÄHR, J., KRACKHARDT, U.W. & DIETRICH, D.: "RaySense": Ein neuartiges strahlenoptisches Verfahren zur absoluten 3D-Vermessung spiegelnder Freiform-Flächen für den Einsatz in der Qualitätsverbesserung	229
BANNEHR, L., HANNUSCH, D., JANY, S. & RUNNE, H.: Komplexes modulares System zur Ableitung von Umweltparametern	295
BARETH, G.: Siehe KOPPE,, W., GNYP, M.L., LAUDIEN, R., JIA, L., LI, F., CHEN, X. & BARETH, G.: Spektrale Charakterisierung von Winterweizen für hyperspektrale Fernerkundungsanalysen	177
BAUER, M., BÖRNER, A., JAHN, H., SCHEELE, M., SCHISCHMANOW, A. & SCHUSTER, R.: Dynamische Beugungsmuster als Passpunktfelder für die geometrische Kalibration	303
BAUMANN, F., BRIEß, K. & KAYAL, H.: Untersuchung von Sensoren zur Lagebestimmung in Picosatelliten	311
BODENMÜLLER, T.: Siehe BÖRNER, A., SUPPA, M., ABMAYR, T., BODENMÜLLER, T., ECKARDT, A., HIRSCHMÜLLER, H., SCHEIBE, K. & STACKENBROCK, B.: Ein modulares Sensorsystem zur multispektralen Erfassung von dreidimensionalen Objekten	319
BÖRNER, A., SUPPA, M., ABMAYR, T., BODENMÜLLER, T., ECKARDT, A., HIRSCHMÜLLER, H., SCHEIBE, K. & STACKENBROCK, B.: Ein modulares Sensorsystem zur multispektralen Erfassung von dreidimensionalen Objekten	319
BÖRNER, A.: Siehe BAUER, M., BÖRNER, A., JAHN, H., SCHEELE, M., SCHISCHMANOW, A. & SCHUSTER, R.: Dynamische Beugungsmuster als Passpunktfelder für die geometrische Kalibration	303
BÖRNER, A.: Siehe ECKARDT, A., BÖRNER, A., JAHN, H., HILBERT, S. & WALTER, I.: Neue optische Sensorsysteme für die Erdbeobachtung	327
BRIEß, K.: Siehe BAUMANN, F., BRIEß, K. & KAYAL, H.: Untersuchung von Sensoren zur Lagebestimmung in Picosatelliten	311
Calow, R.: Siehe KUHN, R.W., NIESE, R., CALOW, R., MICHAELIS, B. & SCHNITZLEIN, M.: Schnelle berührungslose Bestimmung der Oberflächenstruktur langrunder Körper	257
CHEN, X.: Siehe KOPPE,, W., GNYP, M.L., LAUDIEN, R., JIA, L., LI, F., CHEN, X. & BARETH, G.: Spektrale Charakterisierung von Winterweizen für hyperspektrale Fernerkundungsanalysen	177
COENRADIE, B.: Siehe KLEINSCHMIT, B., COENRADIE, B., HOSTERT, P. & HAAG, L.: Ein hybrider Verfahrensansatz zur Versiegelungskartierung	167

DIETRICH, D.: Siehe BÄHR, J., KRACKHARDT, U.W. & DIETRICH, D.: "RaySense": Ein neuartiges strahlenoptisches Verfahren zur absoluten 3D- Vermessung spiegelnder Freiform-Flächen für den Einsatz in der Qualitätsverbesserung	229
DONNER, R.: Ein Beitrag zu den geometrischen Grundlagen der Geoinformatik ...	65
DRAUSCHKE, M., SCHUSTER, H.-F. & FÖRSTNER, W.: Stabilität von Regionen im Sklenraum	29
DREES, R., JAKOB, A. & RUFF, B.P.: CityGML in der Praxis – Nutzung von 3D Stadtmodellen mit kommerzieller Standard-Software	73
ECKARDT, A., BÖRNER, A., JAHN, H., HILBERT, S. & WALTER, I.: Neue optische Sensorsysteme für die Erdbeobachtung	327
ECKARDT, A.: Siehe BÖRNER, A., SUPPA, M., ABMAYR, T., BODENMÜLLER, T., ECKARDT, A., HIRSCHMÜLLER, H., SCHEIBE, K. & STACKENBROCK, B.: Ein modulares Sensorsystem zur multispektralen Erfassung von dreidimensionalen Objekten	319
ERTEN, E.: Siehe REIGBER, A., ERTEN, E., GUILLASO, S. & HELLWICH, O.: I.D.I.O.T.: A Free And Easy-to-Use Software Tool For DInSAR Analysis ...	287
FÖRSTNER, W.: Siehe DRAUSCHKE, M., SCHUSTER, H.-F. & FÖRSTNER, W.: Stabilität von Regionen im Skalenraum	29
FRANKE, K.-H.: Extraktion von Landbedeckungsinformationen – Ein automatisierter Ansatz mittels multitemporaler C-Band Daten	185
GÄHLER, M. & SCHIEWE, J.: Bestimmung der Klassifikationsgüte für räumlich hoch auflösende Fernerkundungsszenen	37
GEHRKE, S. & HAASE, I.: Anwendung des Facetten-Stereosehens auf Bilddaten der HRSC auf Mars Express	45
GEHRKE, S., LEHMANN, H., KÖHRING, R., SCHOLTEN, F., WÄHLISCH, M. & ALBERTZ, J.: Neue topographische Karten der Mars-Oberfläche	83
GEHRKE, S.: Siehe LEHMANN, H., GEHRKE, S., VAN GASSELT, S., ALBERTZ, J. & NEUKUM, G.: Eine kombinierte topographisch-thematische Karte der Centauri und Hellas Montes (Mars)	109
GLOAGUEN, R.: Siehe GOERNER, A., GLOAGUEN, R. & MAKESCHIN, F.: Investigation of land use and land cover change in the Southern Ecuadorian Andes	151
GLOAGUEN, R.: Siehe KÄßNER, A., GLOAGUEN, R. & STANEK, K.-P.: Geomorphologie und Neotektonik anhand von Drainagesystemen und longitudinalen Flussprofilen im Erzgebirge	269
GLOAGUEN, R.: Untersuchung der Abhängigkeit der Landnutzung von verschiedenen Standortparametern im Osterzgebirge mittels Fernerkundung und Statistik	159
GNYP, M.L.: Siehe KOPPE,, W., GNYP, M.L., LAUDIEN, R., JIA, L., LI, F., CHEN, X. & BARETH, G.: Spektrale Charakterisierung von Winterweizen für hyperspektrale Fernerkundungsanalysen	177
GOERNER, A., GLOAGUEN, R. & MAKESCHIN, F.: Investigation of land use and land cover change in the Southern Ecuadorian Andes	151
GRENDUS, B.: Siehe SCHIEWE, J., HÖDL, T. & GRENDUS, B.: FerGI: Innovative E-Learning-Materialien zur Aus- und Weiterbildung in Photogramme	9
GRENDZÖRFER, G.: Praktische Erfahrungen mit dem digitalen Bildflugsystem PFIFF und einer Rollei AIC-45 CIR	335
GRUNDNER, S.: Siehe WEICHEL, H., SCHULTHESS, U., GRUNDNER, S., STEIN, C., SCHELLING, K., HÖBER, E., GRÜNER, V. & JUNG-ROTHENHÄUSLER, F.: Ein multitemporaler Klassifikationsansatz zur Erfassung der	

Landbedeckung mit RapidEye Satellitenbilddaten	211
GRÜNER, V.: Siehe WEICHEL, H., SCHULTHESS, U., GRUNDNER, S., STEIN, C., SCHELLING, K., HÖBER, E., GRÜNER, V. & JUNG-ROTHENHÄUSLER, F.: Ein multi-temporalen Klassifikationsansatz zur Erfassung der Landbedeckung mit RapidEye Satellitenbilddaten	211
GRÜNTAL, G.: Siehe KÄßNER, A., GLOAGUEN, R. & STANEK, K.-P.: Geomorphologie und Neotektonik anhand von Drainagesystemen und longitudinalen Flussprofilen im Erzgebirge	269
GUILLASO, S.: Siehe REIGBER, A., ERTEN, E., GUILLASO, S. & HELLWICH, O.: I.D.I.O.T.: A Free And Easy-to-Use Software Tool For DInSAR Analysis ..	287
HAAG, L.: Siehe KLEINSCHMIT, B., COENRADIE, B., HOSTERT, P. & HAAG, L.: Ein hybrider Verfahrensansatz zur Versiegelungskartierung	167
HAASE, I.: Siehe GEHRKE, S. & HAASE, I.: Anwendung des Facetten- Stereosehens auf Bilddaten der HRSC auf Mars Express	45
HANNUSCH, D.: Siehe BANNEHR, L., HANNUSCH, D., JANY, S. & RUNNE, H.: Komplexes modulares System zur Ableitung von Umweltparametern	295
HAUNERT, J.-H.: Aktualisierung von Geodaten in einer Multiple Representation Database	93
HEILMEIER, H.: Untersuchung der Abhängigkeit der Landnutzung von verschiedenen Standortparametern im Osterzgebirge mittels Fernerkundung und Statistik	159
HELLWICH, O.: Siehe REIGBER, A., ERTEN, E., GUILLASO, S. & HELLWICH, O.: I.D.I.O.T.: A Free And Easy-to-Use Software Tool For DInSAR Analysis ...	287
HENZE, F., SIEDLER, G. & VETTER, S.: Integration automatisierter Verfahren der digitalen Bildverarbeitung in einem Stereoauswertesystem	239
HILBERT, S.: Siehe ECKARDT, A., BÖRNER, A., JAHN, H., HILBERT, S. & WALTER, I.: Neue optische Sensorsysteme für die Erdbeobachtung	327
HIRSCHMÜLLER, H.: Siehe BÖRNER, A., SUPPA, M., ABMAYR, T., BODENMÜLLER, T., ECKARDT, A., HIRSCHMÜLLER, H., SCHEIBE, K. & STACKENBROCK, B.: Ein modulares Sensorsystem zur multispektralen Erfassung von dreidimensionalen Objekten	319
HÖBER, E.: Siehe WEICHEL, H., SCHULTHESS, U., GRUNDNER, S., STEIN, C., SCHELLING, K., HÖBER, E., GRÜNER, V. & JUNG-ROTHENHÄUSLER, F.: Ein multi-temporalen Klassifikationsansatz zur Erfassung der Landbedeckung mit RapidEye Satellitenbilddaten	211
HÖDEL, T.: Siehe SCHIEWE, J., HÖDL, T. & GRENDUS, B.: FerGI: Innovative E-Learning-Materialien zur Aus- und Weiterbildung in Photogramme	9
HOEGNER, L., KUMKE, H., MENG, L. & STILLA, U.: Konzept zur automatischen Texturierung von Gebäudemodellen mit Thermographiebildern	57
HOEGNER, L.: Siehe KUMKE, H., HOEGNER, L., MENG, L. & STILLA, U.: Zur automatischen Integration thermischer Texturen und Merkmale in Gebäudemodelle	101
HÖHLIG, S., GLOAGUEN, R., NIEMEYER, I. & HEILMEIER, H.: Untersuchung der Abhängigkeit der Landnutzung von verschiedenen Standortparametern im Osterzgebirge mittels Fernerkundung und Statistik	159
HOSTERT, P.: Siehe KLEINSCHMIT, B., COENRADIE, B., HOSTERT, P. & HAAG, L.: Ein hybrider Verfahrensansatz zur Versiegelungskartierung	167
JACOBSEN, K.: Herstellung eines Höhenmodells aus einem OrbView-3 Stereopaar	343
JAHN, H.: Siehe BAUER, M., BÖRNER, A., JAHN, H., SCHEELE, M., SCHISCHMANOW, A. & SCHUSTER, R.: Dynamische Beugungsmuster	

als Passpunktfelder für die geometrische Kalibration	303
JAHN, H.: Siehe ECKARDT, A., BÖRNER, A., JAHN, H., HILBERT, S. & WALTER, I.: Neue optische Sensorsysteme für die Erdbeobachtung	327
JAI, L.: Siehe KOPPE,, W., GNYP, M.L., LAUDIEN, R., JIA, L., LI, F., CHEN, X. & BARETH, G.: Spektrale Charakterisierung von Winterweizen für hyperspektrale Fernerkundungsanalysen	177
JAKOB, A.: Siehe DREES, R., JAKOB, A. & RUFF, B.P.: CityGML in der Praxis – Nutzung von 3D-Stadtmodellen mit kommerzieller Standard-Software	73
JANY, S.: Siehe BANNEHR, L., HANNUSCH, D., JANY, S. & RUNNE, H.: Komplexes modulares System zur Ableitung von Umweltparametern	295
JUNG-ROTHENHÄUSER, F.: Siehe WEICHELT, H., SCHULTHESS, U., GRUNDNER, S., STEIN, C., SCHELLING, K., HÖBER, E., GRÜNER, V. & JUNG- ROTHENHÄUSLER, F.: Ein multi-temporalen Klassifikationsansatz zur Erfassung der Landbedeckung mit RapidEye Satellitenbilddaten	211
KÄßNER, A., GLOAGUEN, R. & STANEK, K.-P.: Geomorphologie und Neotektonik anhand von Drainagesystemen und longitudinalen Flussprofilen im Erzgebirge	269
KAYAL, H.: Siehe BAUMANN, F., BRIEB, K. & KAYAL, H.: Untersuchung von Sensoren zur Lagebestimmung in Picosatelliten	311
KERSTEN, T.: Kombination und Vergleich von digitaler Photogrammetrie und terrestrischem Laserscanning für Architekturwendungen	247
KLEINSCHMIT, B., COENRADIE, B., HOSTERT, P. & HAAG, L.: Ein hybrider Verfahrensansatz zur Versiegelungskartierung	167
KÖHRING, R.: Siehe GEHRKE, S., LEHMANN, H., KÖHRING, R., SCHOLTEN, F., WÄHLISCH, M. & ALBERTZ, J.: Neue topographische Karten der Mars-Oberfläche	83
KOLBE, T.H.: Siehe SCHMITTWILKEN, J., KOLBE, T.H. & PLÜMER, L.: Der Gebäudekragen – Eine detaillierte Betrachtung des Übergangs von Gebäude und Gelände	127
KOPPE,, W., GNYP, M.L., LAUDIEN, R., JIA, L., LI, F., CHEN, X. & BARETH, G.: Spektrale Charakterisierung von Winterweizen für hyperspektrale Fernerkundungsanalysen	177
KRACKHARDT, U.W.: Siehe BÄHR, J., KRACKHARDT, U.W. & DIETRICH, D.: "RaySense": Ein neuartiges strahlenoptisches Verfahren zur absoluten 3D-Vermessung spiegelnder Freiform-Flächen für den Einsatz in der Qualitätsverbesserung	229
KRESSE, W.: Photogrammetriestandards bei ISO, OGC, ISPRS und EuroSDR .	137
KUHN, R.W., NIESE, R., CALOW, R., MICHAELIS, B. & SCHNITZLEIN, M.: Schnelle berührungslose Bestimmung der Oberflächenstruktur langrunder Körper ...	257
KUMKE, H., HOEGNER, L., MENG, L. & STILLA, U.: Zur automatischen Integration thermischer Texturen und Merkmale in Gebäudemodelle	101
KUMKE, H.: Siehe HOEGNER, L., KUMKE, H., MENG, L. & STILLA, U.: Konzept zur automatischen Texturierung von Gebäudemodellen mit Thermographiebildern	57
LAUDIEN, R.: Siehe KOPPE,, W., GNYP, M.L., LAUDIEN, R., JIA, L., LI, F., CHEN, X. & BARETH, G.: Spektrale Charakterisierung von Winterweizen für hyperspektrale Fernerkundungsanalysen	177
LEHMANN, H., GEHRKE, S., VAN GASSELT, S., ALBERTZ, J. & NEUKUM, G.: Eine kombinierte topographisch-thematische Karte der Centauri und Hellas Montes (Mars)	109
LEHMANN, H.: Siehe GEHRKE, S., LEHMANN, H., KÖHRING, R., SCHOLTEN, F.,	

WÄHLISCH, M. & ALBERTZ, J.: Neue topographische Karten der Mars-Oberfläche	83
LESSING, R. & SCHUBERT, C.: Methodischer Ansatz zur semantischen Interoperabilität von Landbedeckungsdaten im nationalen Verbundprojekt DeCOVER	193
Li, F.: Siehe KOPPE,, W., GNYP, M.L., LAUDIEN, R., JIA, L., LI, F., CHEN, X. & BARETH, G.: Spektrale Charakterisierung von Winterweizen für hyperspektrale Fernerkundungsanalysen	177
LUHMANN, T., PEIPE, J. & TECKLENBURG, W.: Zertifizierung von Software zur Bündelausgleichung in der Nahbereichsphotogrammetrie	141
MAKESCHIN, F.: Siehe GOERNER, A., GLOAGUEN, R. & MAKESCHIN, F.: Investigation of land use and land cover change in the Southern Ecuadorian Andes	151
MEIERHOLD, N.: Segmentierung von Gebäudewolken aus Laserscannerrohdaten unter Nutzung von 2D-GIS Daten	119
MENG, L.: Siehe HOEGNER, L., KUMKE, H., MENG, L. & STILLA, U.: Konzept zur automatischen Texturierung von Gebäudemodellen mit Thermographiebildern	57
MENG, L.: Siehe KUMKE, H., HOEGNER, L., MENG, L. & STILLA, U.: Zur automatischen Integration thermischer Texturen und Merkmale in Gebäudemodelle	101
MICHAELIS, B.: Siehe KUHN, R.W., NIESE, R., CALOW, R., MICHAELIS, B. & SCHNITZLEIN, M.: Schnelle berührungslose Bestimmung der Oberflächenstruktur langrunder Körper	257
MÜLLER, M.: Siehe WEIDNER, U. & MÜLLER, M.: Pansharpening – Ein Beitrag zur quantitativen Bewertung	221
NEUKUM, G.: Siehe LEHMANN, H., GEHRKE, S., VAN GASSELT, S., ALBERTZ, J. & NEUKUM, G.: Eine kombinierte topographisch-thematische Karte der Centauri und Hellas Montes (Mars)	109
NIEMEYER, I.: Untersuchung der Abhängigkeit der Landnutzung von verschiedenen Standortparametern im Osterzgebirge mittels Fernerkundung und Statistik	159
NIESE, R.: Siehe KUHN, R.W., NIESE, R., CALOW, R., MICHAELIS, B. & SCHNITZLEIN, M.: Schnelle berührungslose Bestimmung der Oberflächenstruktur langrunder Körper	257
PEIPE, J.: Das Four Thirds-System – Bessere Bildqualität für die Photogrammetrie?	265
PEIPE, J.: Siehe LUHMANN, T., PEIPE, J. & TECKLENBURG, W.: Zertifizierung von Software zur Bündelausgleichung in der Nahbereichsphotogrammetrie ...	141
PLÜMER, L.: Siehe SCHMITTWILKEN, J., KOLBE, T.H. & PLÜMER, L.: Der Gebäudekragen – Eine detaillierte Betrachtung des Übergangs von Gebäude und Gelände	127
POHL, D., WETZEL, H.-U. & GRÜNTAL G.: Tektonische Untersuchungen im Raum Vogtland-Leipzig mit Hilfe der Fernerkundung	277
REHOR, M.: Siehe BÄHR, H.-P. & REHOR, M.: Bildanalyse zur Unterstützung beim Katastrophenmanagement	21
REIGBER, A., ERTEN, E., GUILLASO, S. & HELLWICH, O.: I.D.I.O.T.: A Free And Easy-to-Use Software Tool For DInSAR Analysis	287
RIEDEL, T., THIEL, C., SCHMULLIUS, C. & FRANKE, K.-H.: Extraktion von Landbedeckungsinformationen – Ein automatisierter Ansatz mittels multitemporaler C-Band Daten	185

RIEDEL, T.: Siehe THIEL, C., RIEDEL, T. & SCHMULLIUS, C.: Untersuchung der Skalenabhängigkeit der Textur im urbanen Raum mit Quickbird Daten	201
RUFF, B.P.: Siehe DREES, R., JAKOB, A. & RUFF, B.P.: CityGML in der Praxis – Nutzung von 3D-Stadtmodellen mit kommerzieller Standard-Software	73
RUNNE, H.: Siehe BANNEHR, L., HANNUSCH, D., JANY, S. & RUNNE, H.: Komplexes modulares System zur Ableitung von Umweltparametern	295
SCHEELE, M.: Siehe BAUER, M., BÖRNER, A., JAHN, H., SCHEELE, M., SCHISCHMANOW, A. & SCHUSTER, R.: Dynamische Beugungsmuster als Passpunktfelder für die geometrische Kalibration	303
SCHEIBE, K.: Siehe BÖRNER, A., SUPPA, M., ABMAYR, T., BODENMÜLLER, T., ECKART, A., HIRSCHMÜLLER, H., SCHEIBE, K. & STACKENBROCK, B.: Ein modulares Sensorsystem zur multispektralen Erfassung von dreidimensionalen Objekten	319
SCHELLING, K.: Siehe WEICHELT, H., SCHULTHESS, U., GRUNDNER, S., STEIN, C., SCHELLING, K., HÖBER, E., GRÜNER, V. & JUNG-ROTHENHÄUSLER, F.: Ein multi-temporaler Klassifikationsansatz zur Erfassung der Landbedeckung mit RapidEye Satellitenbilddaten	211
SCHIEWE, J., HÖDL, T. & GRENDUS, B.: FerGI: Innovative E-Learning-Materialien zur Aus- und Weiterbildung in Photogrammetrie und Fernerkundung	9
SCHIEWE, J.: Siehe GÄHLER, M. & SCHIEWE, J.: Bestimmung der Klassifikationsgüte für räumlich hoch auflösende Fernerkundungsszenen ..	37
SCHISCHMANOW, A.: Siehe BAUER, M., BÖRNER, A., JAHN, H., SCHEELE, M., SCHISCHMANOW, A. & SCHUSTER, R.: Dynamische Beugungsmuster als Passpunktfelder für die geometrische Kalibration	303
SCHMITTWILKEN, J., KOLBE, T.H. & PLÜMER, L.: Der Gebäudekragen – Eine detaillierte Betrachtung des Übergangs von Gebäude und Gelände	127
SCHMULLIUS, C.: Extraktion von Landbedeckungsinformationen – Ein automatisierter Ansatz mittels multitemporaler C-Band Daten	185
SCHMULLIUS, C.: Siehe THIEL, C., RIEDEL, T. & SCHMULLIUS, C.: Untersuchung der Skalenabhängigkeit der Textur im urbanen Raum mit Quickbird Daten	201
Schnitzlein, M.: Siehe KUHN, R.W., NIESE, R., CALOW, R., MICHAELIS, B. & SCHNITZLEIN, M.: Schnelle berührungslose Bestimmung der Oberflächenstruktur langrunder Körper	257
SCHOLTEN, F.: Siehe GEHRKE, S., LEHMANN, H., KÖHRING, R., SCHOLTEN, F., WÄHLISCH, M. & ALBERTZ, J.: Neue topographische Karten der Mars-Oberfläche	83
SCHUBERT, C.: Siehe LESSING, R. & SCHUBERT, C.: Methodischer Ansatz zur semantischen Interoperabilität von Landbedeckungsdaten im nationalen Verbundprojekt DeCOVER	193
SCHULTHESS, U.: Siehe WEICHELT, H., SCHULTHESS, U., GRUNDNER, S., STEIN, C., SCHELLING, K., HÖBER, E., GRÜNER, V. & JUNG-ROTHENHÄUSLER, F.: Ein multi-temporaler Klassifikationsansatz zur Erfassung der Landbedeckung mit RapidEye Satellitenbilddaten	211
SCHUSTER, H.-F.: Siehe DRAUSCHKE, M., SCHUSTER, H.-F. & FÖRSTNER, W.: Stabilität von Regionen im Skalenraum	29
SCHUSTER, R.: Siehe BAUER, M., BÖRNER, A., JAHN, H., SCHEELE, M., SCHISCHMANOW, A. & SCHUSTER, R.: Dynamische Beugungsmuster als Passpunktfelder für die geometrische Kalibration	303
SIEDLER, G.: Siehe HENZE, F., SIEDLER, G. & VETTER, S.: Integration automatisierter Verfahren der digitalen Bildverarbeitung in einem Stereoauswertesystem	239

STACKENBROCK, B.: Siehe BÖRNER, A., SUPPA, M., ABMAYR, T., BODENMÜLLER, T., ECKARDT, A., HIRSCHMÜLLER, H., SCHEIBE, K. & STACKENBROCK, B.: Ein modulares Sensorsystem zur multispektralen Erfassung von dreidimensionalen Objekten	319
STANEK, K.-P.: Siehe KÄßNER, A., GLOAGUEN, R. & STANEK, K.-P.: Geomorphologie und Neotektonik anhand von Drainagesystemen und longitudinalen Flussprofilen im Erzgebirge	269
STEIN, C.: Siehe WEICHELT, H., SCHULTHESS, U., GRUNDNER, S., STEIN, C., SCHELLING, K., HÖBER, E., GRÜNER, V. & JUNG-ROTHENHÄUSLER, F.: Ein multi-temporaler Klassifikationsansatz zur Erfassung der Landbedeckung mit RapidEye Satellitenbilddaten	211
STILLA, U.: Siehe HOEGNER, L., KUMKE, H., MENG, L. & STILLA, U.: Konzept zur automatischen Texturierung von Gebäudemodellen mit Thermographiebildern	57
STILLA, U.: Siehe KUMKE, H., HOEGNER, L., MENG, L. & STILLA, U.: Zur automatischen Integration thermischer Texturen und Merkmale in Gebäudemodelle	101
SUPPA, M.: Siehe BÖRNER, A., SUPPA, M., ABMAYR, T., BODENMÜLLER, T., ECKARDT, A., HIRSCHMÜLLER, H., SCHEIBE, K. & STACKENBROCK, B.: Ein modulares Sensorsystem zur multispektralen Erfassung von dreidimensionalen Objekten	319
TECKLENBURG, W.: Siehe LUHMANN, T., PEIPE, J. & TECKLENBURG, W.: Zertifizierung von Software zur Bündelausgleichung in der Nahbereichsphotogrammetrie	141
THIEL, C., RIEDEL, T. & SCHMULLIUS, C.: Untersuchung der Skalenabhängigkeit der Textur im urbanen Raum mit Quickbird Daten	201
THIEL, C.: Extraktion von Landbedeckungsinformationen – Ein automatisierter Ansatz mittels multitemporaler C-Band Daten	185
VAN GASSELT, S.: Siehe LEHMANN, H., GEHRKE, S., VAN GASSELT, S., ALBERTZ, J. & NEUKUM, G.: Eine kombinierte topographisch-thematische Karte der Centauri und Hellas Montes (Mars)	109
VETTER, S.: Siehe HENZE, F., SIEDLER, G. & VETTER, S.: Integration automatisierter Verfahren der digitalen Bildverarbeitung in einem Stereoauswertesystem	239
WÄHLISCH, M.: Siehe GEHRKE, S., LEHMANN, H., KÖHRING, R., SCHOLTEN, F., WÄHLISCH, M. & ALBERTZ, J.: Neue topographische Karten der Mars-Oberfläche	83
WALTER, I.: Siehe ECKARDT, A., BÖRNER, A., JAHN, H., HILBERT, S. & WALTER, I.: Neue optische Sensorsysteme für die Erdbeobachtung	327
WEICHELT, H., SCHULTHESS, U., GRUNDNER, S., STEIN, C., SCHELLING, K., HÖBER, E., GRÜNER, V. & JUNG-ROTHENHÄUSLER, F.: Ein multi-temporaler Klassifikationsansatz zur Erfassung der Landbedeckung mit RapidEye Satellitenbilddaten	211
WEIDNER, U. & MÜLLER, M.: Pansharping – Ein Beitrag zur quantitativen Bewertung	221
WETZEL, H.-U.: Siehe POHL, D., WETZEL, H.-U. & GRÜNTAL, G.: Tektonische Untersuchungen im Raum Vogtland - Leipzig mit Hilfe der Fernerkundung	277
WIGGENHAGEN, M.: Zielsetzung und Anwendung der Normen DIN 18740-1, 18740-2 und 18740-3	147