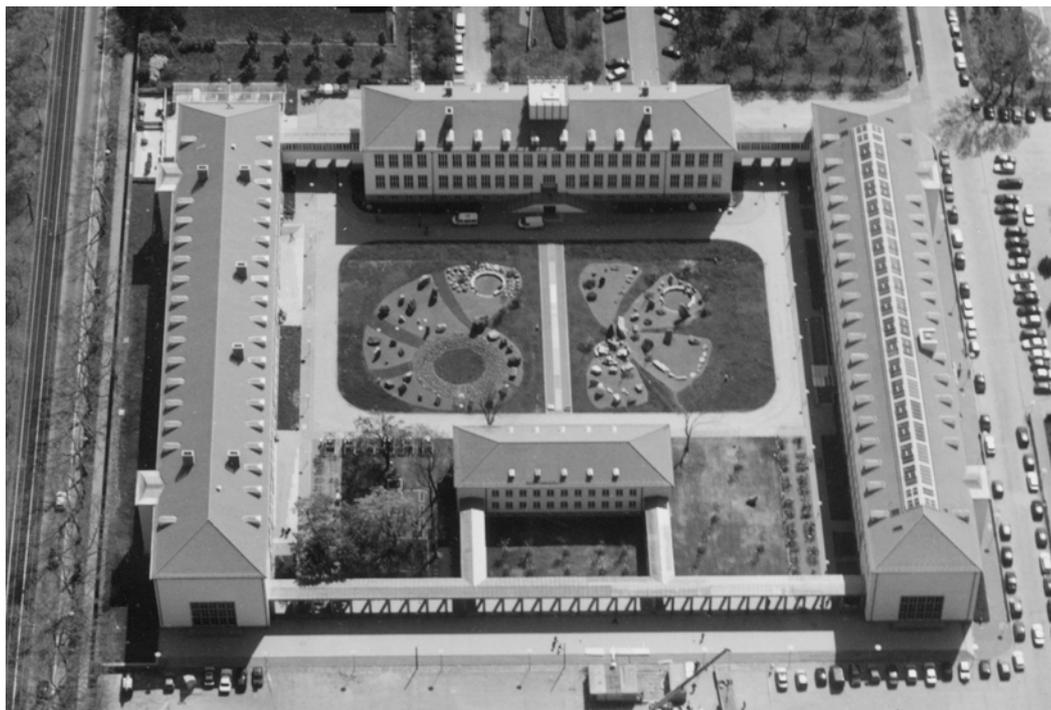


Publikationen der Deutschen
Gesellschaft für Photogrammetrie,
Fernerkundung und Geoinformation e.V.



Band 13

2004



Vorträge
24. Wissenschaftlich-Technische
Jahrestagung der DGPF

15. – 17. September 2004
in Halle



Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg

*Instrumentarien zur nachhaltigen
Entwicklung von Landschaften*

ISSN 0942-2870

Eckhardt Seyfert, Hrsg

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



Band 13

2004

Vorträge

24. Wissenschaftlich-Technische
Jahrestagung der DGPF

15. – 17. September 2004
in Halle

***Instrumentarien zur nachhaltigen
Entwicklung von Landschaften***

ISSN 0942-2870

Eckhardt Seyfert, Hrsg.

ISSN 0942-2870

Publikationen der
Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung
und Geoinformation (DGPF) e.V.
Band 13, 616 S., Potsdam 2004
Hrsg.: Eckhardt Seyfert

© Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung
und Geoinformation (DGPF) e.V.
Münster 2004

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: praesident@dgpf.de

Druck :

Offsetdruckerei Gerhard Weinert
Saalburgstraße 3, 12099 Berlin
Tel.: (030) 600-8620, Fax: (030) 600 86222

Vorwort

Die Region um Halle ist hauptsächlich bekannt durch den Braunkohleabbau, eine ehemals hohe Konzentration an Industrie und den damit verbundenen umweltbeeinflussenden Faktoren. Dieser Charakter der Region hat sich in den vergangenen zehn Jahren grundlegend verändert. Politik und Wissenschaft befassen sich nachhaltig mit dieser Umgestaltung.

Mit einer deutlichen Verbindung zu den landesplanerischen Aufgaben und den Forschungsergebnissen des Tagungsortes Halle steht die Jahrestagung 2004 unter dem Motto

Instrumentarien zur nachhaltigen Entwicklung von Landschaften

Sie wird mit in Zusammenarbeit mit der Martin-Luther-Universität zu Halle und Wittenberg vom 15. bis 17. September 2004 im historischen Melanchtonianum durchgeführt. Der Vorstand dankt der Universität als Mitveranstalterin für die gastfreundliche Aufnahme, die verspricht, dass die Tagung in angenehmer Umgebung an zentraler historischer Stätte erfolgreich werden kann.

Die derzeitige Wirtschaftslage erfordert in vielen öffentlichen und privaten Bereichen eine deutliche Konzentration auf das Wesentliche. Daher hat der Vorstand der Gesellschaft beschlossen, die Jahrestagung künftig auf nur zwei Programmtage zu beschränken und das Exkursionsangebot auf den Anreisetag zu legen. Diese Änderungen kommen bei unserer 24. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung 2004 erstmals zum Tragen. Dies wird zu mehr Parallelsitzungen führen, um die Vielfalt der Themenangebote und die Gelegenheit zum Erfahrungs- und Gedankenaustausch zu gewährleisten.

Trotz der angespannten wirtschaftlichen Situation ist das Interesse an der Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung ungebrochen hoch. Das belegen die 86 angemeldeten Beiträge aus den Arbeitskreisen. Davon können 69 Beiträge in diesem Band und auf der beigefügten CD veröffentlicht werden. Neben der guten organisatorischen Vorbereitung durch die Arbeitskreisleiter, ist dies hauptsächlich der Verdienst der 158 Autoren, von denen 18 an mehreren Beiträgen mitgewirkt haben. Es ist auch gelungen, bereits in diesem Tagungsband die ersten Beiträge von der Mars-Express Weltraummission veröffentlichen zu können.

Ich möchte mich im Namen des Vorstandes der DGPF bei allen Autoren der zum Druck eingereichten Beiträge ausdrücklich bedanken. Ohne ihre Mühe wäre das Erscheine diese 616 Seiten umfassenden Tagungsbandes nicht möglich gewesen.

Mit der örtlichen Vorbereitung haben sich die Kollegen von der Martin-Luther-Universität zu Halle-Wittenberg große Mühe gegeben. Wir hoffen, dass diese Mühe durch zahlreiche Beteiligung an der Tagung belohnt wird.

Eckhardt Seyfert
Herausgeber

INHALTSVERZEICHNIS

Ausbildung

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

SCHÄFER, D.: WebGIS-Schule – Der Einstieg für Schulen und Hochschulen in Geographische Informationssysteme (GIS)	11
KÖNIG, G. & WESER, T.: Entwicklungen zu einem adaptiven Lernangebot	19
KATTERFELD, CH. & KREMEIKE, K.: eLearning in der Geoinformatik – Die Projekte ELAN und FerGI	27
LINDNER, W.: Digitale Photogrammetrie am PC – Neue Ansätze für die Ausbildung	35

Bildanalyse

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

BAUERHANSL, CH., WÜRLÄNDER, R. & RIEGER, W.: Verbesserte Ableitung von Geländemodellen aus der digitalen Bildzuordnung	41
HOFMANN, A.D. & SCHWALBE, E.: Evaluation automatisch rekonstruierter Gebäudemodelle aus Flugzeugscannerdaten	51
WENDT, A., LUHMANN, T., RIEDE, R. & WEISENSEE, M.: Multiple Bildkorrelation im dreidimensionalen Objektraum mit konvergenten Aufnahmen	59
PAKZAD, K & HELLER, J.: Automatic Scale Adaptation of Semantic Nets	67
BUTENUTH, M.: Extraction of Field Boundaries and Wind Erosion Obstacles from Aerial Imagery	77
GÄHLER, M., SCHIEWE, J., BOHMANN, G. & JANOWSKY, R.: Kombination von Laserscanningdaten und höchstauflösenden multispektralen Bilddaten zur Biotoptypenklassifizierung	87
GERKE, M.: Quality Assessment of Road Databases Using Aerial Imagery	95
SAUR, G. & KRÜGER, W.: Automatische Feingeokodierung von SAR-Bildern mittels robuster Karte-zu-Bild-Registrierung	105
SCHWALBE, E., MAAS, H.-G., WAGNER, S. & ROSCHER, M.: Akquisition und Aus- wertung digitaler Hemisphärenbilder für waldökologische Untersuchungen .	113
STRAUB, B.-M. & WIGGENHAGEN, M.: Ein Multiscalenansatz zur automatischen Ableseung von Wellenhöhen in Videobildern	121

KÄSER, M. & REULKE, R.: Laserscanner in der As-Built Dokumentation	129
--	-----

Geoinformationssysteme

(Leitung: Prof. Dr.-Ing. Monika Sester)

SAYDA, F. & REINHARDT, W.: Aktualisierung der Geodaten eines LBS unter Einbeziehung der Nutzer	135
STERN, CH.: Ein mobiles Navigations- und Informationssystem für Wanderer	143
GÖSSELN V. G., BUTHENUTH, M. & TIEDGE, M.: Integration von Daten unterschiedlicher Herkunft	151
MEYER, U., SCHMIDT, C. & WEYAND, C.: Webservices – die Basis für den wirtschaftlichen Einsatz von Geodatenservern in verteilten Unternehmenssparten	161
KOCH, A.: Semantisch korrekte Integration von Digitalem Gelände- und Landschaftsmodell – Verfahren und Ergebnisse	167
KRAUS, K., ATTWENGER, M., BRIESE, C. & MANDELBURGER, G.: Qualitätsmaße für digitale Geländemodelle am Beispiel eines Photogrammetrie- und eines Laserscannerprojektes	175
MEISSNER, B., WYSS, D., ZAKRZEWSKI, M., TEUSAN, S. & HOFFMANN, H.: GIS gestützte Methoden zur Erfassung von Waldressourcen in der Mongolei im Rahmen der Entwicklungszusammenarbeit	187
MEISSNER, B., RICHTER, M. & DOLP, S.: FE-basiertes Wurzelschwamm-Monitoring in der Wiederaufforstung der Lausitzer Tagebau-Folgelandschaft	195
BRZANK, A. & LOHMANN, P.: Steigerung der Genauigkeit von Digitalen Geländemodellen im Küstenbereich aus Laserscannermessungen	203
CZEGKA, W.: Die Qualität der SRTM-90m Höhendaten im Hinblick auf Anwendungsmöglichkeiten in den Geo- und Umweltwissenschaften	211
GRENZDÖRFFER, G.: Möglichkeiten der Fernerkundung für den Aufbau eines Alleenkatasters	219
MEINEL, G. & REICHERT, S.: Flächenwirkung des deutschen Autobahnnetzes – Konzept und erste Ergebnisse einer GIS-gestützten Analyse	227

Internationale Standardisierung

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

DÖRSTEL, C., REULKE, R. & SCHWEBEL, R.: Berücksichtigung digitaler Kameras im neuen Normentwurf E DIN 18740-4	235
---	-----

LAKES T.M.: Standardisierung von Geoinformationssystemen aus Sicht der städtischen Planung	243
KRESSE, W.: Committee Draft der ISO 19130 "Sensor and data models for imagery and gridded data"	251

Interpretation von Fernerkundungsdaten

(Leitung: Prof. Dr. Cornelia Gläßer)

KLEINSCHMIT, B. & HYUN-OK KIM: Anwendung sehr hochauflösender Satellitenbilddaten zur urbanen Biotp- und Nutzungstypenkartierung – dargestellt am Beispiel der südkoreanischen Megastadt Seoul	263
BANZHAF, E.: Detektion von potenziellen Industriebrachen mittels Fernerkundungs- und GIS Daten. Das Beispiel Baltimore City, Maryland, USA	271
SCHIEWE, J.: Fusion multi-sensoraler Daten zur Extraktion von Oberflächenkanten	279
OBERLE, A.: Anwendung von GIS und Auswertung von Fernerkundungsdaten zur Bestimmung geeigneter Flächen für Wasserkonzentrationstechniken in Syrien	287
BUCERIUS, M. & FUß, R.: Fernerkundung auf Schutz- und Förderflächen – Landnutzung von ausgewählten Moorschutzgebieten in Nordbayern	295
GERIGHAUSEN, H. & MÖLLER, M.: Detektion von Schlaggrenzen und der Bodenbearbeitungsrichtung ackerbaulich genutzter Flächen aus höchstauflösenden Fernerkundungsdaten (Quickbird)	303

Nahbereichsphotogrammetrie

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

SCHULZE, M. & HAMPEL, U.: Erfassung und Analyse von Prüfkörpern in der Materialprüfung durch Computertomographie	317
PUTZE, T.: Einsatz einer Highspeedkamera zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern in Gasströmungen Messbildern	325
KERSTEN, T.P., MECHELKE, K. & HÖNNIGER, C.: Topographische Geländeaufnahme mit terrestrischem 3D-Laserscanner	333
ASCHOFF, T., THIES, M., WINTERHALDER, D., KRETSCHMER, U. & SPIECKER, H.: Automatisierte Ableitung von forstlichen Inventurparametern aus terrestrischen Laserscannerdaten	341
RESSL, C.: Vermessung der Pegasus-Statue auf der Wiener Staatsoper mittels Photogrammetrie sowie terrestrischen Nahbereichs-Laserscannings	349

HASTEDT, H., LUHMANN, T. & TECKLENBURG, W.: Bestimmung von Einflussgrößen in der Nahbereichsphotogrammetrie mittels Monte-Carlo-Simulation	359
RAGUSE, K., DERPMANN-HAGENSTRÖM, P. & KÖLLER, P.: Verifizierung von Simulationsmodellen für Fahrzeugsicherheitsversuche	367
RIETDORF, A. & GIELSDORF, F.: Kalibrierung von Laserscannern	375
WIGGENHAGEN, M., ELMHORST, A. & WISSMANN, U.: Digitale Nahbereichsphotogrammetrie zur Objektrekonstruktion der Bremer Hanse Kogge	383

Fernerkundung in der Geologie

(Leitung: Dr. Hans-Ullrich Wetzel)

FRANZKE, H.J., FISCHER, C., MÜLLER, R. & WETZEL, H.-U.: Das Strukturmuster des Harzes, ermittelt aus Satellitendaten und digitalen Geländemodellen ..	391
GLOTZBACH, C. & PRINZ, T.: Bewertung von Landsat-ETM+- und ASTER-Daten im Hinblick auf ihre geologische Aussagekraft am Beispiel des intrakratonen Amadeus Basins, Finke Gorge National Park (Australien) ..	397
KAROW, T. & PRINZ, T.: Erfassung strukturgeologischer Daten in ariden Gebieten auf der Basis von digitalen Höhenmodellen und hochauflösenden stereoskopischen Luftbildern am Beispiel des intrakratonen Amadeus Basins, Finke Gorge National Park (Australien)	407
MÜNZER, U., SCHARRER, K. WEBER-DIEFENBACH, K. & GUDMUNDSSON, Á.: Integration von ENVISAT_ASAR Daten in ein GIS-System zum Katastrophen-Monitoring im Rahmen des ENVISAT-Projektes [ID 142]	417
MONET, S. & TANK, V.: Der Einfluss von Geogasemissionen an der Erdoberfläche auf die thermale Signatur der Austrittsstelle – Untersuchungen mit einem Wärmebildgerät an künstlichen Mofetten	431
SOMMER, T., SCHODLOK, M.C. & WETZEL, H.-U.: Untersuchungen zur spektralen Klassifizierung von Magmatiten und Sedimenten nahe Hami, NW-China mit ASTER-SWIR-Daten	441
OTT, N. & KOLLERSBERGER, T.: Satellitenbildoptimierung und Zielklassenkartierung alterierter Mineralisationen in den zentralen Anden Chiles	449
BIND, J.: Makhtesh Ramon, Israel – Beispiel einer geologischen Auswertung hyperspektraler Fernerkundungsdaten in ariden Gebieten	459

Sensoren und Plattformen

(Leitung: Dr. Rainer Sandau)

SCHOLTEN, F., GWINNER, K., GIESE, B., OBERST, J., ROATSCH, T., JAUMANN, R., NEUKUM, G.: HRSC auf Mars Express – Photogrammetrische Datenverarbeitung im planetaren Umfeld	467
JACOBSEN, K.: Generierung und Validierung von Höhenmodellen aus Weltrauminformationen	475
SCHROEDER, M., REINARTZ, P., LEHNER, M. & MÜLLER, R.: Validation of stereo-data of the SPOT HRS camera system	483
ZIEMANN, H. & GROHMANN, D.: Stand des EuroSDR-Projektes Digitale Kameras	491
BÖRNER, A., HETZHEIM, H., KIEMLE, C., LAPORTE, L. & WIRTH, M.: Simulations- ansätze für das Wasserdampf-Differential-Absorbtiions-Lidarsystem WALES	495
BEISL, U.: Radiometrische Verarbeitung der ADS40 Bilddaten	505
SCHEELE, M., JAHN, H. & SCHUSTER, R.: Geometrische Kalibration von CCD Kameras mittels Beugungsbildern	513
NIEKE, J. et. al.: APEX: Current Status of the Airborne Dispersive Pushbroom Imaging Spectrometer	519
HEIPKE, C., SCHMIDT, R., EBNER, H., SPIEGEL, M. & NEUKUM, G.: Bestimmung der äußeren Orientierung des Mars Express Orbiters	529
GRIESBACH, D., BÖRNER, A., SCHEELE, M., SCHEIBE, K., SUJEW, S., BODENMÜLLER, T. & SUPPA, M.: Kombiniertes Einsatz von Zeilenkamera und inertialem Messsystem	539
MULSOW, C. & HANNUSCH, D.: Untersuchungen zu einem flugzeugbasierten Digitalkamera-System mit direkter Sensororientierung	547
ALBERTZ, J., GEHRKE, S., LEHMANN, H., SCHUMACHER, T. & NEUKUM, G.: Die ersten Blätter des neuen Kartenwerks "Topographic Image Map Mars 1:200 000"	555
DRESCHER, A.K.: Geometrische Grenzen für den Einsatz der Time Delay and Integration Methode (TDI) in Zeilenkameras für Fernerkundung	565
JANSSEN-WEETS, S., FISLER, A., JANTOS, R. & WEISENSEE, M.: Fernerkundung im Labor – Ein Outdoor-Handspektrometer in der Laboranalytik	573
LOHMANN, P., JACOBSEN, K., PAKZAD, K. & KOCH, A.: Vergleichende Informa- tionsextraktion aus SAR- und optischen Bildern	581

Anlagen	591
KNÖPPEL, A. & PIETZSCH, T.: Vergleich von Bündelblockausgleichung und sequentieller relativer Orientierung von Bildtripeln zur Roboterpositionierung	(593)
KUHN, R.W., MICHAELIS, B., CALOW, R., KASZUBIAK, M. & TORNOW, M.: Echtzeitfähiger Multipositionierungssensor	(601)
Autorenverzeichnis	607

WebGIS-Schule - Der Einstieg für Schulen und Hochschulen in Geographische Informationssysteme (GIS)

DIRK SCHÄFER¹

Zusammenfassung: Geographische Informationssysteme (GIS) im Internet – auch als WebGIS bezeichnet – stellen mittlerweile in zahlreichen Bereichen eine wichtige Ergänzung zu anderen GIS-Anwendungen dar. Insbesondere für Schulen und Hochschulen bieten sich WebGIS-Lösungen als hervorragende Einstiegsmöglichkeiten zur Nutzung von GIS an. Die Gründe für den Einsatz von WebGIS reichen von (1) der Verfügbarkeit an jedem Ort, wo ein Internetzugang vorhanden ist, (2) dem Fehlen von zusätzlichen Installationskosten sowie Installationsaufwand einer Software im Schul- bzw. Hochschulnetz (und fehlenden Lizenzkosten für eine GIS-Software beim Client, über (3) die Reduktion der Funktionalitäten im WebGIS, die für den Anwender eine leichtere Bedienung und einen leichteren Zugang bedeuten sowie einen Abbau der Berührungsängste bewirken, bis (4) zu dem Kostenfaktor, das die Nutzung von WebGIS-Diensten für Schulen und Hochschulen in der Regel kostenlos ist.

Somit ist WebGIS ein ideales Tool für Schulen und Hochschulen zum Einstieg in die Nutzung und Anwendung von GIS. Vor diesem Hintergrund wurde das Angebot „WebGIS-Schule“ (<http://www.webgis-schule.de>) für Schulen und Hochschulen als gemeinsames Projekt vom Geographischen Institut der Johannes Gutenberg Universität Mainz mit dem Landesmedienzentrum Rheinland-Pfalz entwickelt. Mit diesem WebGIS-Server (basierend auf ArcIMS-Technologie) können Geodaten in Form digitaler Karten oder interaktiver Anwendungen zentral aufbereitet und für andere Nutzer über einen Web-Browser zugänglich gemacht werden. „WebGIS-Schule“ ist über einen HTML-Client zugänglich, somit werden zur Nutzung der Dienste keine Downloads von speziellen Zusatzprogrammen benötigt.

Die beiden WebGIS-Dienste "Das Klima von Deutschland" (Klimadaten und Klimadiagramme von 68 Stationen) und "Das Klima weltweit" (Klimadaten und Klimadiagramme von 1272 Stationen) wurden gemeinsam von Herrn Dr. Dirk Schäfer und Herrn StD Lothar Püschel entwickelt und im Unterricht (Schule und Hochschule) erprobt. Es stehen die klassischen Funktionen (z.B. freie Ausschnittswahl, Layertechnik, Hotlinks, Datenbankabfragen, Buffern, Messen) zur Verfügung. Somit ist WebGIS für Schulen und Hochschulen eine ideale Methode zum Einstieg in GIS.

1. Einleitung

Die Entwicklung von geographischen Informationssystemen (GIS) hat neue Perspektiven und Möglichkeiten der Integration von Geoinformationen in den unterschiedlichsten Anwendungsbereichen eröffnet und längst haben sich GIS auch außerhalb der klassischen Einsatzgebiete zum unentbehrlichen Analyseinstrument für raumbasierte Fragestellungen etabliert. Aufgrund der ständig wachsenden Bedeutung von Geoinformationen wird in jüngster Zeit immer mehr darüber nachgedacht, GIS in der Schule einzusetzen und als festen Bestandteil des Erdkundeunterrichts zu integrieren. Die Länder Baden-Württemberg und Hamburg sind bereits dabei, die Idee in die Tat umzusetzen; in einigen Pilotschulen werden dort GIS bereits im Unterricht genutzt. In Zukunft werden GIS sicherlich bundesweit im Erdkundeunterricht – fest im Lehrplan verankert – eingesetzt werden. Daneben können GIS auch nutzbringend in anderen Fächern (Biologie, Sozialwissenschaften) angewandt werden (Schäfer und Mund, 2001).

¹ Dr. Dirk Schäfer, Geographisches Institut, Johannes Gutenberg-Universität, 55099 Mainz, e-mail: Dirk.Schaefer@Uni-Mainz.de, Internet: <http://www.geo.uni-mainz.de/schaefer>

Der Einsatz von GIS eignet sich besonders für den projekt- und handlungsorientierten Unterricht in der Schule. Neben den thematischen und instrumentalen Lernzielen können SchülerInnen methodische Kenntnisse zu GIS erwerben und damit auch zu aktuellen Themen der digitalen Informationsverarbeitung, wie z.B. Datenbanken. Der Einsatz von GIS im Erdkundeunterricht dient somit auch dem allgemeinen Vertraut machen sowie der Übung im Umgang mit der EDV. Letztlich werden die SchülerInnen auf die sie später erwartende Berufswelt bzw. das Studium vorbereitet. Für interessierte Schüler mögen sich indirekt berufliche Perspektiven in einem expandierenden Feld der Anwendung von GIS öffnen.

In Hochschulen werden GIS schon lange in Forschung und jetzt auch immer mehr in der Lehre, also der Ausbildung der (Geographie-) Studierenden einbezogen. Insbesondere im Bereich der Lehrerausbildung ist die feste Integration neuer Medien und besonders von GIS notwendig, nicht zuletzt um die Lehrer von Morgen auf das weite Gebiet von GIS und den Einsatz von GIS in der Schule vorzubereiten.

2 GIS gehört die Zukunft – auch in Schulen und Hochschulen

„Es wird geschätzt, dass ca. 80 % aller Entscheidungen im öffentlichen und privaten Leben einen räumlichen Bezug haben.“ (IMAGI, 2003). Diese gern zitierte Zahl verdeutlicht die zentrale Bedeutung von Geoinformationen: Ein Großteil aller erhobenen Daten haben einen räumlichen Bezug und werden daher als Geoinformationen bezeichnet. Geoinformation werden in zahlreichen Bereichen als modernes Instrument für staatliches und privates Handeln eingesetzt und nehmen somit eine Schlüsselposition in der modernen Informations- und Kommunikationsgesellschaft ein. Zur Bearbeitung und Analyse von Geoinformationen werden GIS genutzt, die somit praktisch untrennbar von dem rasch expandierenden Markt von Geoinformationen zu sehen sind.

Die zunehmende wirtschaftliche Bedeutung von Geoinformationen und deren Bearbeitung zeigt sich in einem stetigen Wachstum des Geoinformationsmarktes. Dies erfordert eine qualifizierte Ausbildung von GIS-Spezialisten, damit in Zukunft kein Fachkräftemangel entsteht. Um den Nachwuchs auf diese Entwicklungen entsprechend vorzubereiten und auch den Markt mit GIS-Spezialisten zu bedienen, müssen Hintergründe und Bedeutung von Geoinformationen und GIS möglichst früh vermittelt werden – am besten bereits in der Schule. SchülerInnen und auch Studierende müssen mit dem Umgang von Geoinformationen und GIS vertraut werden. Die Bereiche „Bildung“ und „Ausbildung“ müssen auf die genannten Entwicklungen reagieren und Konzepte und Lösungen anbieten.

Der Einsatz eines GIS dient der übersichtlichen Analyse von Geoinformationen, der Darstellung von Arbeitsergebnissen und fördert damit gezielt das vernetzte Denken – eine Fähigkeit, die in allen neuen Lehr- und Bildungsplänen einen hohen Stellenwert einnimmt. Der Unterricht mit GIS wird dadurch stärker als bisher das schülerzentrierte, projektorientierte und mittelfristig auch fächerverbindende Lernen in den Vordergrund rücken.

Für die erfolgreiche Nutzung von GIS im schulischen Unterricht ist die entsprechende Lehrerausbildung mitentscheidend. Die drei Phasen (Lehrerausbildung, Referendariat, Fortbildung von LehrerInnen) sollen möglichst durch Kooperationen mit Partnern aus Behörden, Unternehmen und wissenschaftlichen Einrichtungen begleitet sein, um so den Lehramtskandidaten und ausgebildeten Lehrkräften die Möglichkeit zu bieten, Praxiserfahrung auch außerhalb von Universität und Schule zu gewinnen.

3. WebGIS-Schule - der didaktische Einstieg in GIS

Obwohl der Einsatz von GIS in Schulen und Hochschulen unstrittig als sinnvoll einzuschätzen ist, schreitet der Einsatz und die Nutzung von GIS im Unterricht recht langsam voran. Dies liegt vor allem an folgenden Gründen: GIS-Software ist als Raum- oder Schullizenz teuer und somit für Schulen mit schmalen Budgets schwer erschwinglich. Hinzu kommt, dass die Installation der GIS-Software im Schulnetzwerk nicht immer einfach ist. Zu den Kosten- und Installationsproblemen kommt als weitere Hemmschwelle dazu, dass die Handhabung der GIS-Software für Lehrer und Schüler aufgrund der komplexen Programmstruktur nicht einfach ist. Eine Einarbeitung z.B. in das Diercke GIS ist für einen Anfänger sehr zeitaufwendig und ohne Schulung ist das Programm nur schwer zu erlernen.

Aus den genannten Gründen nutzen die meisten Lehrer GIS nicht, da die Unwägbarkeiten im Unterrichtseinsatz zu groß sind. Und trotz der unbestrittenen Vorteile von GIS in vielen Bereichen, wird auf traditionelle Methoden zurückgegriffen. Mit einem WebGIS, also einer GIS-Anwendung die über das Internet zugänglich ist, ist ein methodischer Weg zur Einführung und Anwendung von GIS im Unterricht entwickelt worden, der die oben genannten Hemmschwellen umgeht. Das Projekt „WebGIS-Schule“ entstand durch die langjährige Zusammenarbeit und den Erfahrungen vom Autor und Herrn StD L. Püschel im Bereich „Didaktische Einführung und Nutzung von GIS in der Schule“, wozu gemeinsame Schulungen, Vorträge und Veröffentlichungen im Rahmen des Arbeitskreises "GIS in der Schule“ in Rheinland-Pfalz gehören. WebGIS-Schule wurde nach didaktischen Überlegungen konzipiert und entwickelt, was die Auswahl der im WebGIS vorhandenen Themen genauso wie Gestaltung der Seiten und die Bereitstellung der Funktionen und Tools betrifft.

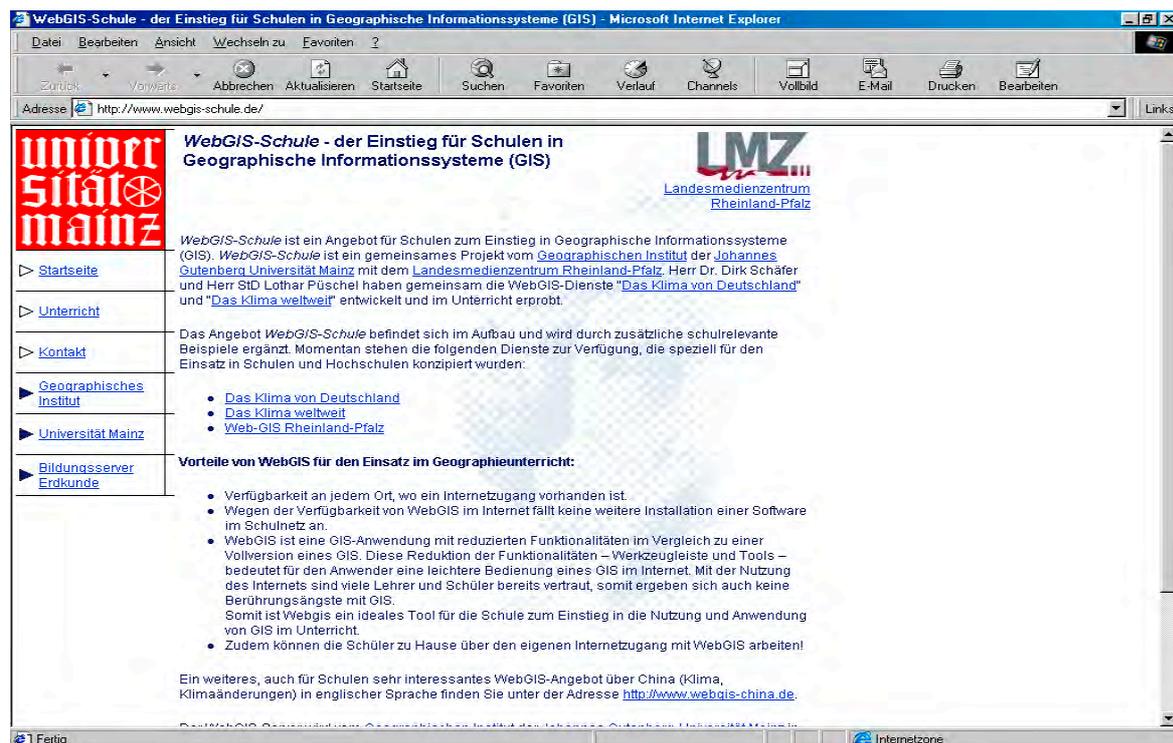


Abb. 1: Die Dienste von WebGIS-Schule erlauben einen skalierbaren Einsatz in Schulen und Hochschulen

Ziel war (und ist) die Bereitstellung einer Anwendung, die die klassischen GIS-Funktionen zur Verfügung stellt und für jedermann kostenfrei nutzbar ist, ohne dass zusätzliche Programme installiert werden müssen. Zudem sollten die Inhalte so konzipiert sein, dass sie im Unterricht lehrplangerecht und sinnvoll eingesetzt werden können. Der Mehrwert des Einsatzes von GIS in der Schule muss transparent sein.

Der WebGIS-Server (ArcIMS-Technologie) wird vom Geographischen Institut der Johannes Gutenberg-Universität Mainz in Kooperation mit dem Zentrum für Datenverarbeitung betrieben. Mit diesem können Geodaten in Form digitaler Karten oder interaktiver Anwendungen zentral aufbereitet und für andere Nutzer über einen Web-Browser zugänglich gemacht werden. WebGIS-Schule ist ein gemeinsames Projekt vom Geographischen Institut der Johannes Gutenberg Universität Mainz und dem Landesmedienzentrum Rheinland-Pfalz.

Die Funktionalitäten im WebGIS sind, im Vergleich zu einer Vollversion eines GIS, reduziert worden. Diese Reduktion der Funktionalitäten bedeutet für den Anwender eine leichtere Bedienung. Mit der Nutzung des Internets sind viele Lehrer und Schüler bereits vertraut, somit ergeben sich auch keine Berührungsängste mit WebGIS, also einem neuen Tool oder Medium. Somit ist WebGIS ein ideales Tool für die Schule zum Einstieg in die Nutzung und Anwendung von GIS im Unterricht. Schüler mit eigenem Internetzugang können mit WebGIS auch zu Hause arbeiten.

Die vom Autor und Herrn L. Püschel gemeinsam entwickelten WebGIS-Dienste "Das Klima von Deutschland" und "Das Klima weltweit" sind bereits im Unterricht in der Schule und an der Hochschule erprobt worden. Zusätzlich wird ein weiteres, auch für Schulen sehr interessantes WebGIS-Angebot über China in englischer Sprache angeboten (<http://www.webgis-china.de>). Hier sind aktuelle Forschungsergebnisse zum Klima und Klimaänderungen in Form von Karten, Grafiken und Datenbanken abrufbar.

3.1 Ein Beispiel für den WebGIS-Einsatz in der Schule

Die folgende Unterrichtseinheit (8. Klasse) ist für jeden Erdkundelehrer mit PC-Grundkenntnissen sowie Internet-Kenntnissen nachvollziehbar. Als weitere Voraussetzung muss ein Computerraum mit Internetanschluss vorhanden sein. Die vorhandenen Funktionen im WebGIS entsprechen den Funktionen einer Werkzeugleiste in einer Vollversion eines GIS (z.B. ArcView 3.x oder Diercke GIS 1.x oder 2.0). Sie ermöglichen die freie, individuelle Ausschnittswahl (Zoomen und Verschieben der Karte), das Identifizieren und Suchen von Objekten, das Aufrufen von sog. „Hot-Links“ sowie logische Abfragen der Datenbank mit dem Abfrage-Manager. Des Weiteren können Strecken auf der Karte gemessen werden und die Karteneinheiten können verändert werden. Zusätzlich kann eine selbst zusammengestellte Karte auch ausgedruckt werden.

Im Sinne einer didaktischen Reduktion sind aber nicht alle Funktionen und Tools einer Vollversion eines GIS verfügbar, was die Handhabung am Anfang erheblich erleichtert. Bei der Arbeit mit dem WebGIS-Dienst „Das Klima von Deutschland“ (auf <http://www.webgis-schule.de>) werden neben den Inhalten zum Klima in Deutschland die Layertechnik eingeführt sowie die typischen GIS-Funktionen kennen gelernt und angewendet. Bei einer späteren Nutzung einer GIS-Vollversion (z.B. Diercke GIS oder ArcView) sind dann diese „Werkzeuge“ und der Umgang damit bekannt.

Anhand von Schritt-für-Schritt-Anleitungen (Püschel und Schäfer, 2004), also didaktisch aufbereiteten Arbeitsblättern, können die SchülerInnen das WebGIS und seine Funktionen kennen lernen. Zunächst soll die Einführung der Grundfunktionen „Layer“ und „aktives Thema“ erfolgen. Dabei wird von traditionellen Methoden ausgegangen, indem topographische Kenntnisse zu den aufgezeigten Bundesländern mit ihren Hauptstädten abgefragt werden, um dann mit gezielten Arbeitsaufträgen über die Funktionen „Hot-Link“ und „Identifizieren“ zusätzliche Möglichkeiten einer GIS-Anwendung kennen zu lernen. Hier werden zuerst topographische Grundkenntnisse abgefragt und wiederholt (die Nachbarstaaten von Deutschland, die Hauptstädte der einzelnen Bundesländer).

Der entscheidende Mehrwert von WebGIS (und GIS) wird über den „Abfragemanager“ und der Formulierung von logischen Abfragen verdeutlicht und genutzt, die Ergebnisse werden im Unterrichtsgespräch ausgewertet. Die SchülerInnen tragen ihre Ergebnisse in eine auf dem

Arbeitsblatt vorgefertigte Tabelle ein (Püschel und Schäfer, 2004). Über das Werkzeug „Identifizieren“ ermitteln die Schüler den Jahresmittelwert für Temperatur und Niederschlag der jeweiligen Landeshauptstadt, die ebenfalls in die Tabelle auf dem Arbeitsblatt eingetragen werden. Zusätzlich sollen die Schüler erarbeiten, dass über die Funktion „Identifizieren“ noch weitere Angaben wie z.B. die Höhe und die geographische Lage der Klimastation abrufbar sind. Hier sollte sich eine erste vergleichende Betrachtung der einzelnen Jahresmittelwerte von Temperatur und Niederschlag in Abhängigkeit von der geographischen Lage sowie der Höhe NN anschließen. Mit dem Werkzeug „Hot-Link“ können zusätzlich Klimadiagramme verschiedener Städte aufgerufen werden können.

Über die Fragestellung zur Ermittlung der kältesten bzw. der wärmsten Klimastation in Deutschland soll das Werkzeug „Abfragemanager“ eingeführt werden. Zuerst sollen die Schüler begründete Vermutungen äußern; wahrscheinlich werden die kälteste Station im Norden und die wärmste Station im Süden Deutschlands erwartet werden. Über den Abfragemanager hat der Schüler die Möglichkeit eine logische Abfrage zu formulieren, um die kälteste bzw. wärmste Jahresmitteltemperatur einer der in der Karte aufgeführten Klimastationen zu ermitteln (Abb. 2).

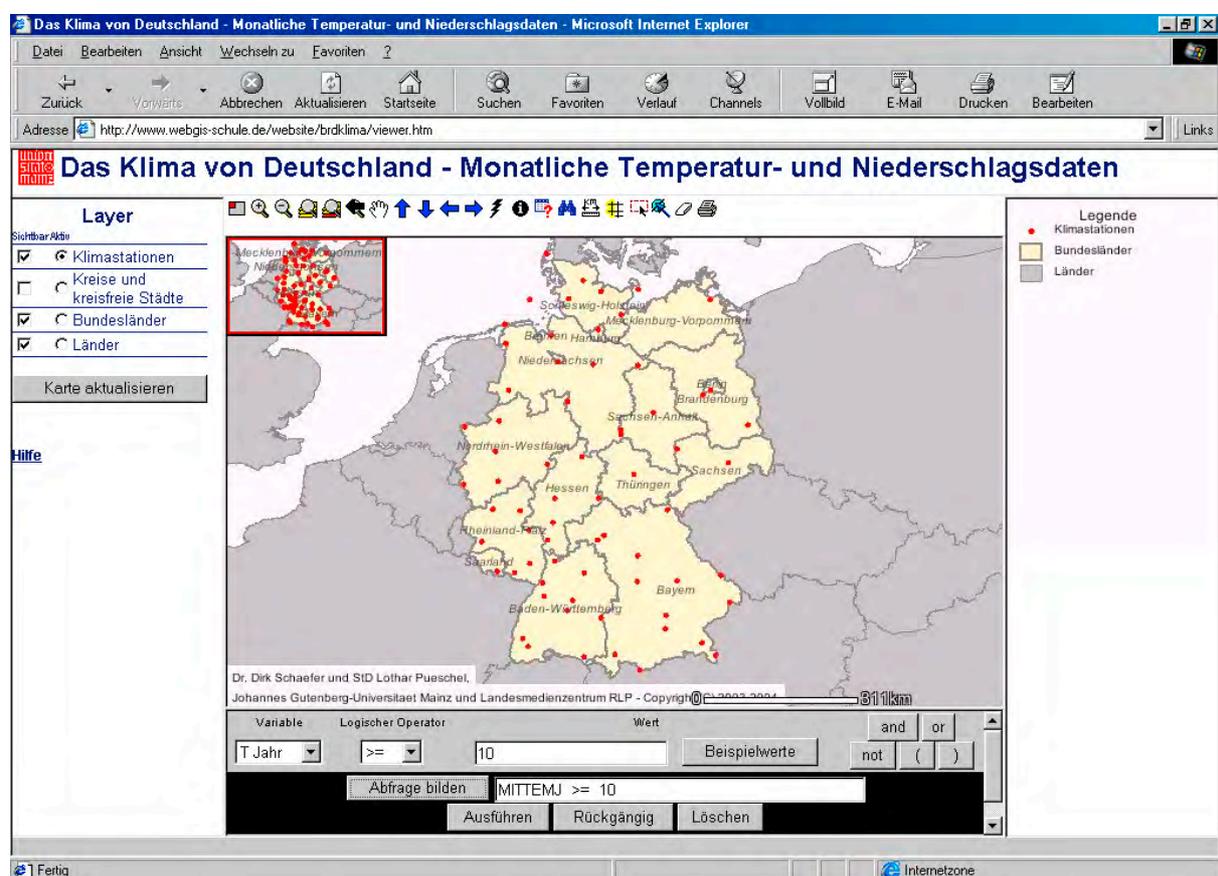


Abb. 2: Im Abfrage-Manager lassen sich logische Abfragen im formulieren; hier sollen die wärmsten Stationen in Deutschland gefunden mit der Abfrage „T Jahr > 10 °C“ werden.

3.2 Ein Beispiel für den GIS-Einsatz in der Hochschule

Das folgende Beispiel soll den Einsatz von WebGIS im Einführungskurs „Klimatologie“ verdeutlichen, der nach dem Curriculum für Diplom-Geographie- und Lehramtsstudierende im Grundstudium verpflichtend ist. Studierende haben somit die Möglichkeit eine GIS-Anwendung und typische GIS-Funktionen kennen zu lernen. Im WebGIS-Dienst „Das Klima welt-

weit“ (auf <http://www.webgis-schule.de>) werden neben einer Weltkarte und einem Welt-Satellitenbild u.a. die monatlichen Temperatur- und Niederschlagsdaten von 1272 Klimastationen sowie die Klimadiagramme nach Walter und Lieth als Hot-Links zur Verfügung gestellt. Mit diesem Karten- und Datenmaterial können die vielfältigsten Klimathemen behandelt werden, die von Klimaklassifikationen über Kontinentalitäts-/Marimitätsfragestellungen bis zur Analyse von Regionalklimaten reichen können.

Im folgenden Beispiel soll das Thema „Der südasiatische Monsun“ behandelt werden. Dazu zoomen die Studierenden mit ausgewähltem Zoom-Werkzeug zunächst auf Südasien (Abb. 3). Nun können mit den Werkzeugen „Identifizieren“ und „Hot-Link“ einzelne Stationen ausgewählt und bezüglich der monatlichen Temperatur- und Niederschlagswerte verglichen werden. Die aufgerufenen Klimadiagramme nach Walter und Lieth („Hot-Links“) eignen sich dank ihrer einheitlichen Skalierung sehr gut für den vergleichenden Einsatz. Die Diagramme werden in neuen Fenstern angezeigt und daher können mehrere Stationen nebeneinander dargestellt und verglichen werden. Anhand von typischen Stationen (z.B. Bombay) kann nun die Unterteilung des Klimas in Jahresabschnitte erfolgen; schnell wird den Studierenden klar, dass weniger die Temperatur als vielmehr der Niederschlag das entscheidende Klimaelement für die Unterteilung in Jahresabschnitte darstellt. Bei weiterer räumlicher Betrachtung der Niederschlagsverteilung zeigen sich auf dem Subkontinent große Unterschiede, die mit der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre erklärt werden können (Abb. 3).

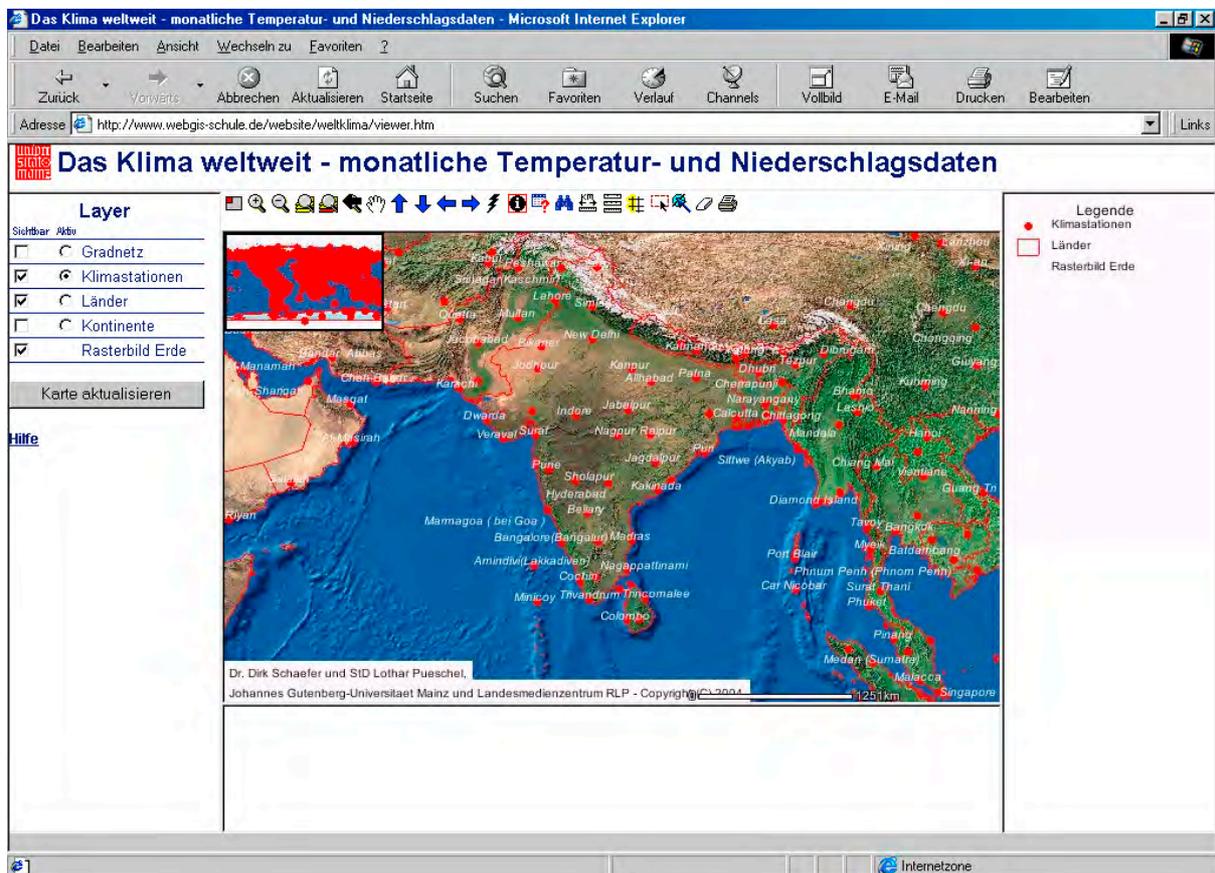


Abb. 3: Freie Ausschnittswahl im WebGIS-Dienst „Das Klima weltweit“.

Auch hier zeigt sich wieder deutlich der Mehrwert vom Einsatz von WebGIS: Neben den fachlichen Inhalten zum Thema Monsun können zusätzlich die Grundfunktionen (Layertechnik, freie Ausschnittswahl, Identifizieren, Hot-Links, Abfrage-Manager) eines GIS erlernt werden.

5. Fazit

Der Einsatz von GIS in Schulen und Hochschulen wird in den nächsten Jahren stark zunehmen. Dies ist als eine sicherlich sinnvolle Entwicklung zu werten, insbesondere vor dem stark expandierenden Markt rund um Geoinformationen. Die Einführung von GIS in Schulen läuft bislang eher schleppend, was unter anderem mit den Kosten, Installationsproblemen und Berührungsängsten mit GIS verbunden ist. Zur Einführung von GIS in der Schule bietet sich das entwickelte WebGIS hervorragend an, da für die Nutzung kein spezielles Programm benötigt wird, sondern nur ein Rechner mit Internetanschluss. Die (mit dem PC vertrauten) Nutzer können bereits nach kurzem Arbeiten mit den Werkzeugen des WebGIS umgehen. Voraussetzung ist, dass grundlegendes Basiswissen über GIS vorhanden ist, also z.B. die Kenntnis der Layertechnik (sichtbare und aktive Layer) und auch das Vorhandensein einer Datenbank, die für alle Objekte der einzelnen Layer Datenbankeinträge bereitstellt. Für die Nutzung der meisten Werkzeuge wird keine Anleitung benötigt, die Nutzung erfolgt intuitiv, da z.B. die Lupe als Button für das „Zoom“-Werkzeug aus anderen Programmen bekannt ist. Das Werkzeug „Hot-Link“ ist den meisten GIS-Nutzern bekannt, sonstigen Nutzern muss diese Funktion erklärt werden. Die Bezeichnung „Hyperlink“ für dieses Werkzeug wäre den meisten Nutzern wahrscheinlich auch nicht hilfreicher. Daneben muss auch der „Abfrage-Manager“ erläutert werden, wobei die Syntax Nutzern mit Datenbankanntnissen keinerlei Probleme bereitet.

Der Nutzer von WebGIS benötigt kein detailliertes Spezial- bzw. Hintergrundwissen (z.B. Was ist ein Shapefile?), sondern er kann mit dem WebGIS direkt arbeiten, da die Karten und Grafiken bereits alle vorbereitet sind. Die genannten Arbeitsblätter ermöglichen den ersten und einführenden Einsatz von GIS in der Schule – ohne Hindernisse! Die vorgestellten Beispiele aus Schule und Hochschule verdeutlichen, dass auch (GIS-)unerfahrenen Nutzern die Nutzung von GIS-Funktionen problemlos möglich ist.

5 Literaturverzeichnis

- CREMER, P., B. RICHTER UND D. SCHÄFER: GIS im Unterricht - Einführung und Überblick. In: Praxis Geographie 2, Februar 2004. 39-43.
- HEIDT, V., D. SCHÄFER, J. SABBAGH UND M. MURAWSKI (2002): Innovative GIS-Einsatzmöglichkeiten - Virtuelle Planung mit 3D-Simulation sowie multimedialer und interaktiver Einsatz von GIS an Schulen. In: Forschungsmagazin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz. Sonderausgabe Messen 2002. 24-30.
- INTERMINISTERIELLER AUSSCHUSS FÜR GEOINFORMATIONSWESEN (IMAGI), (2003): „Geoinformation und moderner Staat“.
http://www.imagi.de/de/download/Geoinformation_modernerStaat_dt.pdf
- MUND, J.P. UND D. SCHÄFER (2002): GIS macht Schule - Einsatz von GIS im Erdkundeunterricht. AGIT 2002. In: Strobl, J., Blaschke, T. und G. Griesebner (Hrsg.): Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XIV. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2002. 375-380.
- PÜSCHEL, L. UND D. SCHÄFER (2004): Geographische Informationssysteme (GIS) im Internet am Unterrichtsbeispiel "Das Klima von Deutschland". In: Praxis Geographie 2, Februar 2004. 4-7.
- RICHTER, B. (1999): Unterrichten mit GIS – eine neue Perspektive für die Geographie? In: Praxis Geographie 5. S. 39.
- SCHÄFER, D. UND J.P. MUND (2001): Einsatz Geographischer Informationssysteme im Erdkundeunterricht. In: Geographie heute 195. 18-21.
- SCHÄFER, D. UND G. ORTMANN (2002): GIS macht vieles einfacher. GIS im Erdkundeunterricht (Teil I). In: Geogr. Rdsch. 4. 2002. 52-56.

- SCHÄFER, D. (2002): Geografische Informationssysteme (GIS) im Erdkundeunterricht. In: ESRI Anwenderkonferenz 2002. 9. Deutschsprachige Anwenderkonferenz. Konferenz-CD. 5 Seiten.
- SCHÄFER, D. UND G. ORTMANN (2002): Aller Anfang ist schwer! GIS im Erdkundeunterricht (Teil II). In: Geogr. Rdsch. 6. 2002. 52-56.
- SCHÄFER, D. UND G. ORTMANN (2002): Die Mühe lohnt sich! GIS im Erdkundeunterricht (Teil III). In: Geogr. Rdsch. 7/8. 2002. 59-63.
- SCHÄFER, D. (2003): GIS in Schools: Experiences and Progress in Germany. In: ESRI International User Conference 2003. Conference CD.
- SCHÄFER, D. (2003): Scalable GIS Applications for Schools - Examples from Germany. In: ESRI 2003. 18 th European User Conference; 10. Deutschsprachige Anwenderkonferenz. Conference CD.
- SCHÄFER, D. UND L. PÜSCHEL (2003): WebGIS - A methodical tool for the Introduction of GIS in Schools. In: ESRI 2003. 18 th European User Conference; 10. Deutschsprachige Anwenderkonferenz. Conference CD.

Entwicklungen zu einem adaptiven medialen Lernangebot

GERHARD KÖNIG¹ & THOMAS WESER¹

Zusammenfassung: An der Technischen Universität Berlin beschäftigt sich die Arbeitsgruppe Geoinformationstechnik mit der Erstellung einer Web-basierten Lehreinheit, die als Ergänzung zur Lehrveranstaltung Fernerkundung eingesetzt wird. Studierende können auf diese Weise orts- und zeitunabhängig den Lerninhalt üben, ihr Wissen erweitern und vertiefen. Bei dem am ehemaligen Fachgebiet Photogrammetrie und Kartographie entwickelten Lernprogramm handelt es sich um eine vollständige Eigenentwicklung, deren Inhalte in unregelmäßigem Abstand gepflegt werden.

1 Motivation

Anlässlich der DGPF-Jahrestagung in Bochum analysierte J. Schiewe in einem Übersichtsartikel stichprobenartig sechs in der deutschen Universitätslandschaft entwickelte Lernprogramme zu Geoinformatik und Fernerkundung. Er stellt in seinen Ausführungen fest, „dass die meisten e-Learning-Angebote das Potenzial der zusätzlichen Darstellungsformen, Kommunikationsmöglichkeiten und Lerndialoge nur teilweise ausschöpfen. Insbesondere wird die Möglichkeit einer adaptiven Wissensdiagnostik (d.h. nicht nur die Korrektur von Übungsfragen, sondern auch individuell angepasste Empfehlungen zum weiteren Vorgehen) kaum genutzt“ (SCHIEWE 2003, S.58). Durch die vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit erheblichen Finanzmitteln geförderte Initiative "Neue Medien in der Bildung" konnte dieses Manko teilweise behoben werden. Insbesondere die Projekte *geoinformation.net* (QUADT ET ALL. 2004) und *gimolus* (MÜLLER 2004) belegen den Fortschritt bei der Entwicklung von Internet basierten Lernmodulen. Die Nachhaltigkeit dieser sehr gelungenen Projekte muss sich allerdings nach Ablauf der Förderung durch das BMBF noch beweisen.

Trotz der großen Fortschritte bestehen aber weiterhin nur wenige Ansätze, die einer Individualisierung von Lernweg, -tiefe und -geschwindigkeit gerecht werden. Unter anderen beschäftigen sich die Autoren mit dieser Problematik – erste Entwicklungen wurden auf dem Workshop E-Learning in Geoinformatik und Fernerkundung in Vechta vorgestellt (KÖNIG, WESER 2004). Im Rahmen dieses Papers soll der Datenbank basierte Ansatz näher vorgestellt werden.

2 Technische Realisation

2.1 Softwarevoraussetzung

Die Entwicklungen an der TU Berlin setzen einen Web-Server voraus, auf dem die Standardtools (Apache, MySQL, PHP) implementiert sind. Ein Standard PC unter Linux wird vom Autorenteam für diese Aufgabe eingesetzt.

¹ Gerhard König, Thomas Weser, Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik, Technische Universität Berlin, EB 9, Straße des 17.Juni 135, 10623 Berlin, e-mail: g.koenig@fpk.tu-berlin.de, thweser@fpk.tu-berlin.de

Je mehr Interaktivität der Module verlangt wird, desto notwendiger wird der Einsatz einer Programmiersprache. Die größte Flexibilität bieten Java-Anwendungen, die als Applets mit der angeforderten Web-Seite geladen werden und dann in der virtuellen Maschine des jeweiligen Browsers, also auf der Client-Seite, ausgeführt werden.

Des Weiteren muss der Server, abhängig von der Benutzereingabe, individuelle Web-Seiten generieren können, wie z.B. bei der Leistungskontrolle. In diesem Fall wird das Testergebnis und ggf. Hilfestellungen bei nicht korrekter Beantwortung der Fragen übermittelt. Es müssen deshalb Schnittstellen zur Verfügung stehen, die es dem Webserver erlauben externe Programme aufzurufen, die angepasste Web-Seiten generieren und zum Client schicken. Bei der Implementierung des Lernprogramms wurde auf Java Servlets bzw. auf das Java Server Pages (JSP) Konzept zurückgegriffen, mit dem eine Trennung von Inhalt und Visualisierung möglich ist. Zur Verwaltung der Servlets wird ein sogenannter Container benötigt, diese Aufgabe übernimmt die Referenzimplementierung Tomcat.

Auf dem Client muss der Browser die Ausführung von Java Code zulassen, PlugIns zur Darstellung von Animation und Grafik (Flash, Quicktime, SVG) müssen eingerichtet sein.

2.2 Datenbankansatz

Wie bereits erwähnt, werden zur die Steuerung des an der TU Berlin entwickelten Lernprogramms Datenbanken eingesetzt. Dies sind die

- Administrations-Datenbank, die den Nutzern einen individuellen Zugang zu den Lernmodulen erlaubt, deren Aktivitäten protokolliert und analysiert werden. Nach einem festlegbaren Bewertungsschema werden die Studierenden Leistungsgruppen (geringe, durchschnittliche bzw. sehr gute Kenntnisse) zugeordnet.
- Content-Datenbank, in der die Abfolge der Web-Seiten festgelegt wird. Jeder Seite ist eine Kennzahl zugeordnet, aus der ihre Reihenfolge hervorgeht. Die Zuordnung eines Schwierigkeitsgrads erlaubt es, den Ablauf des Lernprogramms zu bestimmen und den Kurs individuell an den Wissensstand des Lernenden anzupassen. Die zusätzliche Information über den Inhalt erlaubt es darüber hinaus, in Zukunft Module zu projekt-orientierten Aufgaben zusammenzustellen.
- Fragen-Datenbank, durch die ein zentraler Fragenpool verwaltet wird. Auf die Überlegungen bei der Gestaltung und Verwaltung des Fragenpools wird in diesem Artikel noch näher eingegangen.

Das Zusammenwirken dieser drei Datenbanken schafft die Voraussetzung für ein interaktives Lernprogramm, das sich an die individuellen Kenntnisse des Nutzers anpasst. Durch mehrere Tests während des Lernprogramm-Ablaufs kann der jeweilige Kenntnisstand der Lernenden erfasst werden. Nähere Informationen zum Aufbau der Datenbanken ist in der Veröffentlichung zum Kongress der ISPRS zu entnehmen (KÖNIG, WESER, 2004).

3 Navigations-Steuerung

Der Ablauf des Tutorials zur Fernerkundung ist in Abbildung 1 grafisch dargestellt. Nach der ersten Anmeldung muss der Teilnehmer einen Eingangstest absolvieren. Die Auswertung des Tests führt zu einer Einstufung des Lernenden in eine Leistungsklasse, die den weiteren

Verlauf der Lehreinheit bestimmt. Abhängig von der Bewertung wird ein individueller, leistungsabhängiger Lernpfad zusammengestellt.

Ein erfolgreicher Abschluss des Lehrgangs setzt die kontinuierliche Bearbeitung aufeinander aufbauender Kapitel voraus. Jedes Kapitel gliedert sich in mehrere Seiten. Am Ende eines Kapitels muss der Teilnehmer sein Wissen in einem Kurzttest nachweisen. Auch hier entscheidet das Leistungs-Niveau über den Schwierigkeitsgrad der gestellten Fragen. Bei fehlerhafter Beantwortung kann das fehlende Wissen durch Wiederholungen oder ggf. durch die Bearbeitung von Zusatzmodulen nachgeholt werden. Detaillierte Ausführungen zu den Übungsaufgaben und Tests finden sich im folgenden Kapitel. Jedes Testergebnis wird genutzt, um die Leistungs-Einstufung des Teilnehmers zu aktualisieren. Dieser Regelkreis wiederholt sich so lange, bis alle Kapitel bearbeitet sind und ein Abschlusstest durchgeführt werden kann.

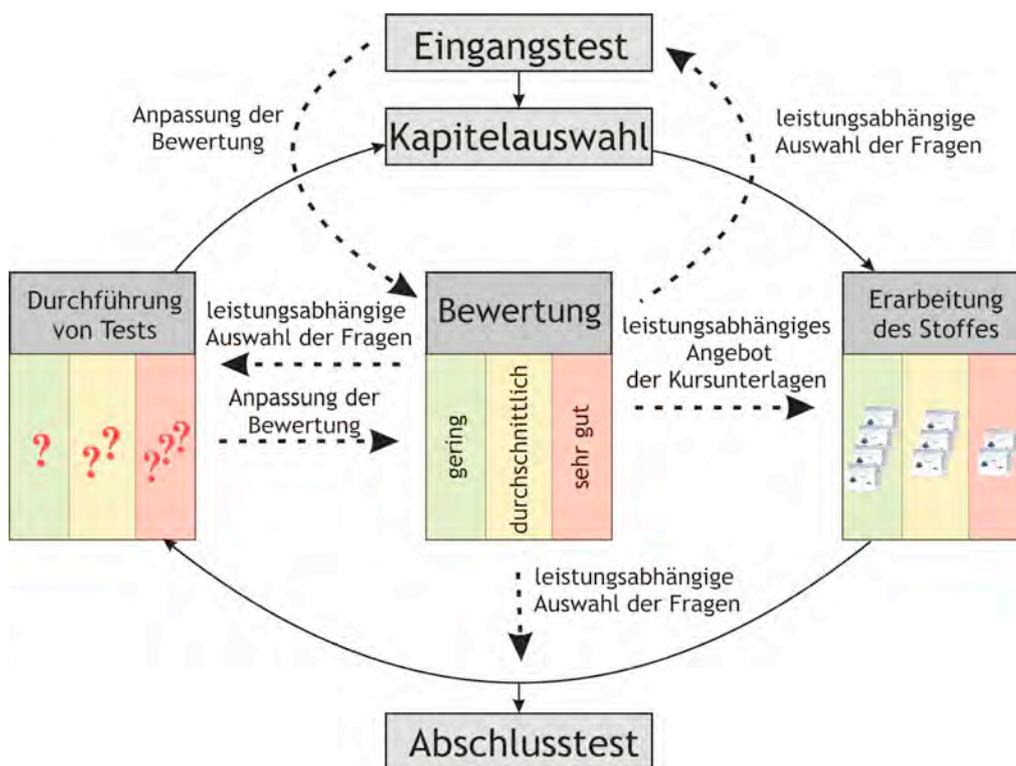


Abb. 1: Überblick über den Ablauf des Lernprogramms

4 Übungsaufgaben und Tests

4.1 Fragenpool

Webbasiertes, wie auch herkömmliches Lernen, ist nur dann erfolgreich, wenn das erlernte Wissen korrekt angewendet werden kann. Fragen und Tests bilden einen grundlegenden Beitrag zur Leistungsbeurteilung der Teilnehmer. Im Lernprogramm wird der Kenntnisstand in mehreren Ebenen überprüft.

- In einem Eingangstest werden die Vorkenntnisse des Lerners eingeschätzt.

- Durch kleinere Übungsaufgaben zu ausgewählten Seiten wird das Verständnis kontrolliert. Die Antworten werden ausgewertet, bei nicht korrekter Beantwortung der Fragen stehen Lösungshilfen (Expertenrat) zur Verfügung.
- Leistungsbezogene Tests, deren Ergebnisse sowohl den Ablauf des Programms beeinflussen, wie auch den Lernerfolg quantifizieren, stehen am Ende jedes Kapitels. Wie in einer Prüfungssituation werden die Fragen an das Leistungsniveau des Teilnehmers angepasst, ggf. müssen diese Tests wiederholt werden.
- In einem umfangreichen Abschlusstest, der Fragen aus dem gesamten Fernerkundungs-Spektrums enthält, muss der Lernende seine Kenntnisse unter Beweis stellen.

Die Verwaltung der Fragen durch eine Datenbank schafft die Voraussetzung für die Einrichtung eines zentralen Fragen-Pools, der mehrere Vorteile bietet:

- Für jede Frage wird Metainformation gespeichert. Neben Angaben zum Autor, dem Themenschwerpunkt und der Kapitelzugehörigkeit ist eine Zuordnung in eine von drei Schwierigkeitsklassen (leicht - mittel - schwer) obligatorisch.
- Diese Datenbankinformation wird genutzt, um eine differenzierte, dem Leistungsstand des Lernenden entsprechende Bearbeitung zu ermöglichen. Den Teilnehmern wird ein individueller, leistungsorientierter Lernpfad angeboten.
- Wird beim Vergleich der Antwort mit der Lösungsdatenbank ermittelt, dass die Frage falsch beantwortet wurde, kann über einen in der Datenbank festgelegten Verweis Expertenrat angefordert werden.
- Durch die Kennzeichnung bereits gestellter Fragen kann verhindert werden, dass insbesondere im Falle von Wiederholungstests eine bereits beantwortete Frage erneut gestellt wird.

4.2 Fragenauswahl

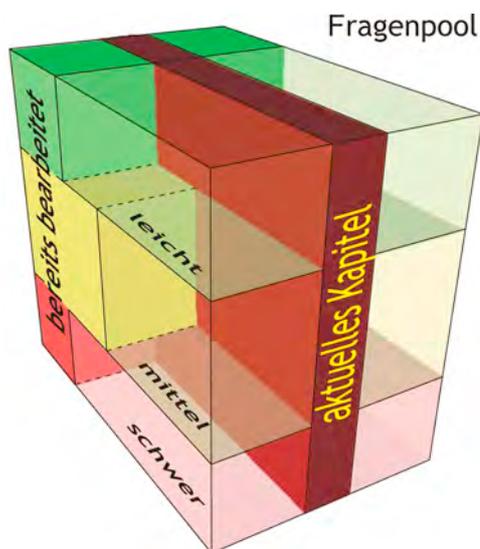


Abb. 2: Schema der Fragenauswahl

Wie bereits beschrieben, werden die im Verlauf des Tutorials gestellten Fragen aus einem Fragenpool ausgewählt. Zu jedem Zeitpunkt des Tutorials gibt es nur eine limitierte Anzahl von Fragen, die zur Verfügung stehen. Zunächst beschränkt das aktuelle Kapitel die relevante Fragenmenge. Sie wird um die bereits bearbeiteten Fragen reduziert. Schließlich bestimmt die Leistungsstärke des Kursteilnehmers aus welcher Teilmenge die Frage abgerufen wird (siehe Abbildung 2). Beim Abschlusstest steht hingegen wieder jede Frage aus allen Themenbereichen des Pools zur Verfügung. Diese zunächst sehr konsequent erscheinende Vorgehensweise ist allerdings nicht frei von Nachteilen.

Das bisherige Verfahren würde implizieren, dass der Studierende nur sehr schwer seine ihm bisher zugeteilte Leistungsklasse verlassen und in eine höhere bzw. niedrigere auf- bzw. absteigen könnte. Wie in einer Prüfungssituation sollten auch im Lernprogramm die Fragen

an das Leistungsniveau der Teilnehmer angepasst werden. Es muss also möglich sein, auch Aufgaben einer anderen Leistungsstufe zu stellen. Dies wird durch ein einfaches Verfahren sichergestellt. Zunächst muss der Dozent festlegen, mit welcher Wahrscheinlichkeit leichte, mittlere und schwierige Fragen den Kursteilnehmern unterschiedlichen Leistungsniveaus gestellt werden sollen. Der Verteilungsschlüssel wird durch zwei Kennzahlen gesteuert. Das Beispiel in Abbildung 3 zeigt, dass Leistungsträger 20% leichte, 30% mittelschwere und 50% schwierige Fragen erwarten können. Ein weiteres Kriterium unter Verwendung einer Zufallszahl im Intervall [0,100] regelt die endgültige Zuweisung zur Fragenklasse. Die im Beispiel ausgewählte Zahl 61 führt dazu, dass guten Teilnehmern eine als anspruchsvoll eingestufte Aufgabe gestellt wird. Schwächere bzw. durchschnittliche Kursteilnehmer werden hingegen mit einer als durchschnittlich eingeschätzten Frage konfrontiert.

Schwierigkeitsgrad der Fragen	Kenntnisstand	Verteilungsschlüssel
<div style="display: flex; justify-content: space-around; font-size: small;"> leicht durchschnittlich schwer </div>	gering	(50:90)
	durchschnittlich	(30:70)
	sehr gut	(20:50)

Abb. 3: Fragenzuteilung am Beispiel eines durchschnittlichen Teilnehmers

Die Ergebnisse der Lernkontrolle bilden die Grundlage für die Ablaufsteuerung. Abhängig von der korrekten Beantwortung der Fragen wird der gewichtete Quotient aus richtig beantworteten zu allen Fragen gebildet und als Maß für die Zuordnung der Studierenden in eine Leistungsklasse herangezogen. Die eben beschriebene Vorgehensweise ermöglicht es, den Ablauf des Lernprogramms auf das Niveau der Teilnehmer differenzierter abzustimmen.

5 Benutzeroberfläche

Neben der didaktischen Aufbereitung von Lernmodulen sind auch Benutzerführung und grafische Gestaltung von entscheidender Bedeutung für die Akzeptanz des Lern-Angebots (ASCHE ET ALL, 2004).

Um dem Kursteilnehmer eine selbsterklärende und übersichtliche Handhabung des Systems anzubieten, wurde das Browserfensters in vier Rahmen gegliedert (siehe Abbildung 4). Im rechten Teil erscheint eine Inhaltsübersicht zur besseren Orientierung. Abhängig vom gewählten Kapitel verändert sich die Darstellung dynamisch und lässt die dem Kapitel zugeordneten Seiten erkennen, die vom Teilnehmer (abhängig von seinem Leistungsstand) ausgewählt werden können. Durch farbliche Hervorhebung ist auf den ersten Blick ersichtlich, welche Seite aktuell bearbeitet wird.

Als weitere Informations- und Navigationshilfen stehen im unteren Rahmen graphische Buttons zur Verfügung, die den Ablauf der Bearbeitung beeinflussen. So kann bei Bedarf das Haupt-Menü abgerufen, das Glossar geöffnet bzw. ein Taschenrechner zur Ausführung ein-

facher Berechnungen aktiviert werden. Die zentralen Steuerelemente (Pfeiltasten), mit denen die vorhergehende bzw. die Folgeseite aufgerufen werden kann, befinden sich ebenfalls in diesem Rahmen.

Um unübersichtliches Scrollen zu vermeiden, wurde darauf geachtet, dass der zu vermittelnde Wissensstoff auf mehrere Seiten verteilt ist. Eine Vielzahl von Abbildungen und Beispielen, insbesondere durch Flash- bzw. Quicktime-Animationen soll die Verständlichkeit der Texte erleichtern.

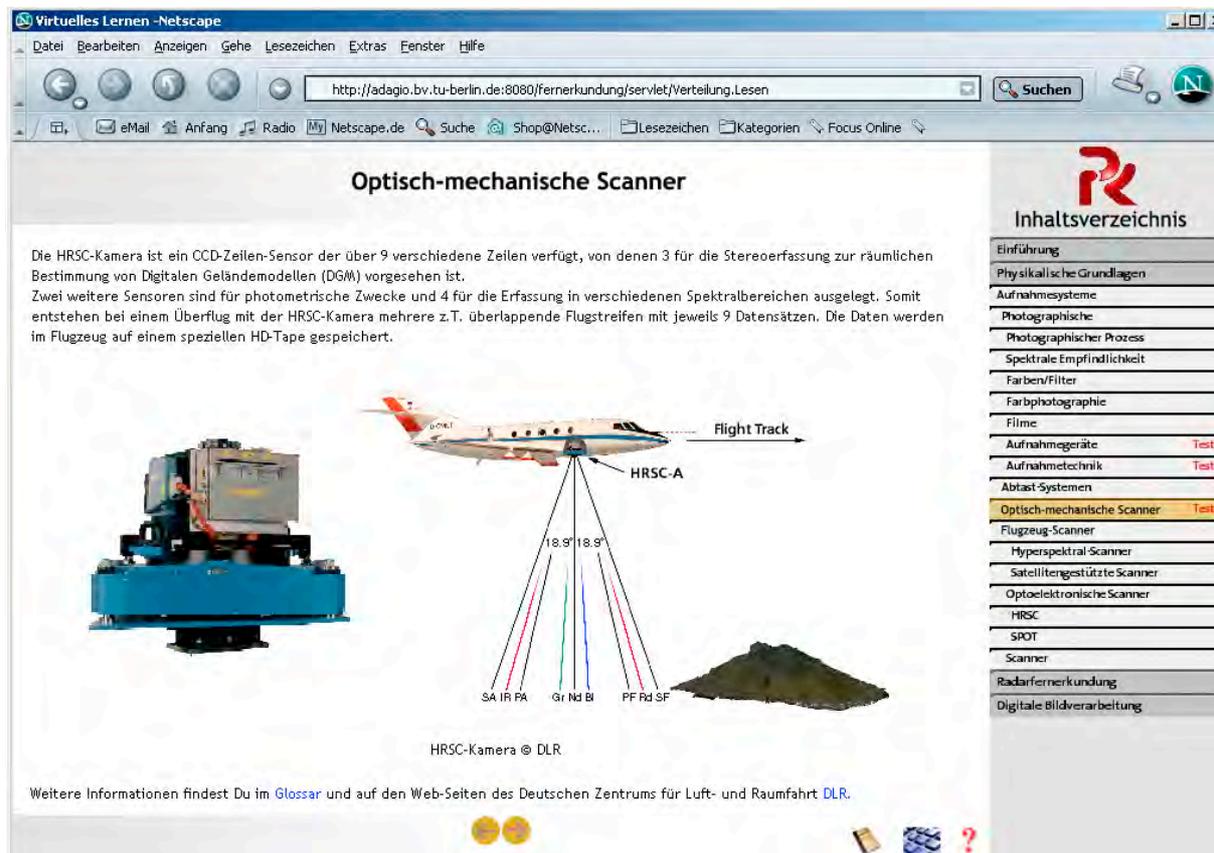


Abb. 4: Ausschnitt aus Kapitel 2 – Aufnahmesysteme, in dem u. a. auch optisch mechanisch arbeitende Flugzeugscanner vorgestellt werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit den derzeitigen Arbeiten konnte ein Grundgerüst entwickelt werden, das für zukünftige inhaltliche Erweiterungen offen ist. Gelingt es, den modularen Ansatz der Lernumgebung konsequent umzusetzen und damit die praktische Anwendung der Fernerkundung auch projektorientiert zu gestalten, wird ein großer Schritt in die Richtung des handlungsorientierten Lernens vollzogen, der exploratives Arbeiten auf vielfältigen und individuellen Lernwegen ermöglicht. Die Weiterentwicklung soll im Rahmen von Seminar- und Diplomarbeiten fortgeführt werden.

Darüber hinaus wird sich die Arbeitsgruppe an den Aktivitäten der Projektübergreifenden E-Learning-Initiative Geoinformatik *PELIG*² beteiligen, die es sich zum Ziel gesetzt hat, ein Kooperationsnetzwerk der verschiedenen Entwicklergruppen im Hochschulbereich aufzubauen, um eine verbesserte Austauschbarkeit der Materialien und somit ihre nachhaltige Nutzung zu gewährleisten.

7 Literaturverzeichnis

- ASCHE, H., SIEMER, J., SCHWARZ, J.-A., GRÖNER, S., 2004: Konzeption und Gestaltung der Benutzerschnittstelle des Geoinformations-Lernsystems *geoinformation.net*. In: PLÜMER, L., ASCHE, H. (Hrsg.): Geoinformation – Neue Medien für eine neue Disziplin. Wichmann, Heidelberg, S. 3-14.
- BRAND, S., BÄHR, H.-P., 2004: Lernmodul Fernerkundung. In: PLÜMER, L., ASCHE, H. (Hrsg.): Geoinformation – Neue Medien für eine neue Disziplin. Wichmann, Heidelberg, S. 45-55.
- KÖNIG, G., WESER, TH., 2004: Ein modularisiertes Lernprogramm zur Fernerkundung. In: SCHIEWE, J. (Hrsg.): E-Learning in Geoinformatik und Fernerkundung. Wichmann, Heidelberg, S. 79-88.
- KÖNIG, G., WESER, TH., 2004: A Servlet Based Training Course for Remote Sensing. – ISPRS, Vol. XXXV, Istanbul, im Druck..
- SCHIEWE, J., 2003: eLearning Angebote in Geoinformatik und Fernerkundung: Mehrwert oder Mode-Erscheinung?. In: SEYFERT, E. (Hrsg.): Auf dem Weg zu operationellen Prozessketten in Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation. Publikationen der DGPF, Potsdam, 12: S. 53-60,.
- QUADT U., PLÜMER, L., KOLBE, T.,H., STEINRÜCKEN, J., 2004: Blended Learning mit *geoinformation.net* – Eine Plattform für die multimedia-gestützte Präsenzlehre. In: SCHIEWE, J. (Hrsg.): E-Learning in Geoinformatik und Fernerkundung. Wichmann, Heidelberg, S. 11-20.
- MÜLLER, M., 2004: *gimolus* – GIS- und modellgestützte Lernmodule für umweltwissenschaftliche Studiengänge. In: PLÜMER, L., ASCHE, H. (Hrsg.): Geoinformation – Neue Medien für eine neue Disziplin. Wichmann, Heidelberg, S. 155-166.

² Nähere Informationen zu PELIG finden sich auf der Web-Seite des DGPF-Arbeitskreises Ausbildung: http://www.fzg.uni-vechta.de/mitarbeiter/schiewe/dgpf_ausbildung.htm.

eLearning in der Geoinformatik - Die Projekte ELAN und FerGI

CHRISTIANE KATTERFELD¹ UND KATRIN KREMEIKE²

Zusammenfassung: eLearning hat sich in den letzten Jahren zu einem wichtigen Thema entwickelt, welches für die Hochschulausbildung, und speziell für die Weiterbildung von besonderer Bedeutung ist. Stimulanten für diese Entwicklungen war auf internationaler Ebene unter anderem die Open-Courseware-Initiative des MIT. National haben die BMBF-Initiativen „Neue Medien in der Bildung“ und „Notebook University“ einen bedeutenden Anschlag geleistet. Im Bereich der Geoinformatik wurden diese Möglichkeiten im Rahmen von unterschiedlichen Projekten aufgegriffen. Primär entstanden und entstehen auf diese Weise Module, die als Ersatz bzw. zur Unterstützung der Präsenzlehre genutzt werden können. Der nachfolgende Artikel gibt einen Überblick über eLearning-Projekte in den Geowissenschaften. Weiterhin werden zwei Projekte, die derzeit am Institut für Kartographie und Geoinformatik (ikg) der Universität Hannover bearbeitet werden, vorgestellt.

1 Überblick über eLearning-Projekte zum Thema GIS

Eine sehr umfangreiche Sammlung von Lehrmaterialien zum Thema Geoinformation bietet das Projekt www.geoinformation.net. Selbststudieneinheiten in Form von illustrierten Texten und Animationen stehen einer umfangreichen Foliensammlung, die tatsächlich in den Vorlesungen eingesetzt wird, gegenüber. Zur praktischen Arbeit wurde das sogenannte „GeoCafé“ - eine Lern- und Diskussionsumgebung - entwickelt. Hier können unter Nutzung einer vereinfachten Programmierumgebung Algorithmen zur Verarbeitung von Geodaten geübt werden (BODE ET AL., 2004).

Weiterhin wurde ein sogenanntes „Web-Portal“ entwickelt. Dabei handelt es sich um eine OpenGISConsortium-konforme Service-Infrastruktur zur Auslieferung von Geodaten über das Web (SIMONIS & MERTEN, 2004). Diese technischen Möglichkeiten zeigen Potentiale für das webbasierte Lernen auf. Allerdings wurde kein Anwendungskonzept vorgestellt. Die Integration in den Lernprozess, sowie der Funktionsumfang des Web-Portals im Kontext von eLearning bleibt somit unklar.

In www.gimolus.de („GIS- und Modellgestützte Lernmodule für umweltorientierte Studiengänge“) werden neben den klassischen text-, abbildungs- und animationsbasierten Lerneinheiten Technologien eingesetzt, die es den Studierenden ermöglichen, über einen Terminalserver auf GIS-Software zuzugreifen. Somit wird ein sehr hoher Grad an GIS-Funktionalität bereitgestellt. Serverseitig steht als „Virtuelle Landschaft“ eine Datenbasis für ein ca. 50km x 50km großes Testgebiet bereit, an welcher Methoden der räumlichen Analyse dargestellt und geübt werden können. Dieses Projektbeispiel zeigt sehr eindrucksvoll die technischen Möglichkeiten der Client-Server-Kommunikation auf. Allerdings zeigen die Erfahrungen in GIMOLUS auch, dass hinsichtlich der Nachhaltigkeit gerade bei solch komplexen technischen Infrastrukturen Probleme auftreten können (MÜLLER, 2004). Die Gewährleistung von Betrieb, Pflege und Weiterentwicklung ist nach Projektende oft ungewiss.

¹ Dipl.-Geogr. Christiane Katterfeld & ² Dipl.-Geogr. Katrin Kremeike, Institut für Kartographie und Geoinformatik, Universität Hannover, Appelstraße 9a, 30167 Hannover, e-mail: {Christiane.Katterfeld, Katrin.Kremeike}@ikg.uni-hannover.de

Im Projekt **Webgeo** (www.webgeo.de) wurden thematische Lehrmodule zu Inhalten des Grundstudiums in der Physischen Geographie entwickelt. Das textlich vermittelte Basiswissen wird für die Bereiche Klima, Morphologie, Pedologie, Ökologie und Hydrologie durch wirksame Animationen, interaktive Elemente und virtuelle Exkursionen untermauert (GLÄBER & THÜRKOW, 2004). Hier kann der Studierende Zusammenhänge selbst erkunden, bzw. Fakten spielerisch lernen.

Weitere – internationale – Projekte, auf die hier aber nicht näher eingegangen werden soll, sind beispielsweise:

- GITTA (Geographic Information Technology Training Alliance) aus der Schweiz (<http://www.gitta.info/> - vgl. LORUP & BLEISCH, 2003),
- LEAP (Learning Effectiveness Alliance Program) am Department of Spatial Sciences/ University of Curtin (<http://www.cage.curtin.edu.au/leap/> - vgl. METTERNICHT, 2003).

2 eLearning am Institut für Kartographie und Geoinformatik

Das Institut für Kartographie und Geoinformatik der Universität Hannover (ikg) ist an zwei Projekten zum Thema eLearning in der Geoinformatik beteiligt. Zum Einen handelt es sich um das Projekt ELAN (eLearning Academic Network Niedersachsen, <http://www.learninglab.de/elan/index.php>) mit dem Teilprojekt „Werkstatt Virtuelle Landschaft“, welches in Trägerschaft des GIS-Zentrums der Universität Hannover (www.gis-zentrum.uni-hannover.de) ausgeführt wird. Zum Anderen ist dies das Projekt FerGI (Fernstudienmaterialien Geoinformatik). In den Projekten werden jeweils unterschiedliche Komponenten von eLearning entwickelt und im praktischen Einsatz in der Lehre direkt geprüft.

2.1 Die Werkstatt Virtuelle Landschaft

2.1.1 Ziel des Projektes

Im Rahmen des ELAN-Teilprojektes „Werkstatt Virtuelle Landschaft“ entsteht eine interaktive Lernumgebung, anhand derer Studierende Zusammenhänge, Abläufe und Prozesse im Raum explorativ erfahren und Grundlagen der Geo-Informationssysteme (GIS) experimentell erkunden können. Diese Idee entspricht dem Grundgedanken des GIS-Zentrums. Hierin haben sich Wissenschaftler aus verschiedenen Disziplinen zusammengeschlossen um – nicht trotz, sondern gerade wegen ihrer unterschiedlichen Schwerpunkte – Probleme der räumlichen Datenverarbeitung gemeinsam zu bearbeiten und Erfahrungen und Kompetenzen auszutauschen. In diesem Sinne bündelt die Virtuelle Landschaft nicht nur das Wissen und die Sichtweisen der verschiedenen Disziplinen, sie kann – so ist die Vision – auch als Kommunikationsmittel für das interdisziplinäre Lernen fungieren.

2.1.2 Das Konzept der Werkstatt

Das Konzept der Lernumgebung lässt sich durch ein 3-stufiges Modell beschreiben (Abb. 1). Die Basis der Lernumgebung bilden durch interaktive und animierte Elemente angereicherte Kurse, welche Basiswissen zur Geoinformatik in Form von text-basierten Lernmaterialien vermitteln. Derzeit befinden sich die Kurse „Webkartographie“ und „GIS – Internetstrukturen und –Architekturen“ in der Erarbeitung. Die Virtuelle Landschaft setzt auf diese Grundlagenkurse auf, um dort mit der Gelegenheit zu praktischen Übungen anzusetzen, wo die theoretischen Erläuterungen es erfordern. Auf die Virtuelle Landschaft werden wiederum sogenannte

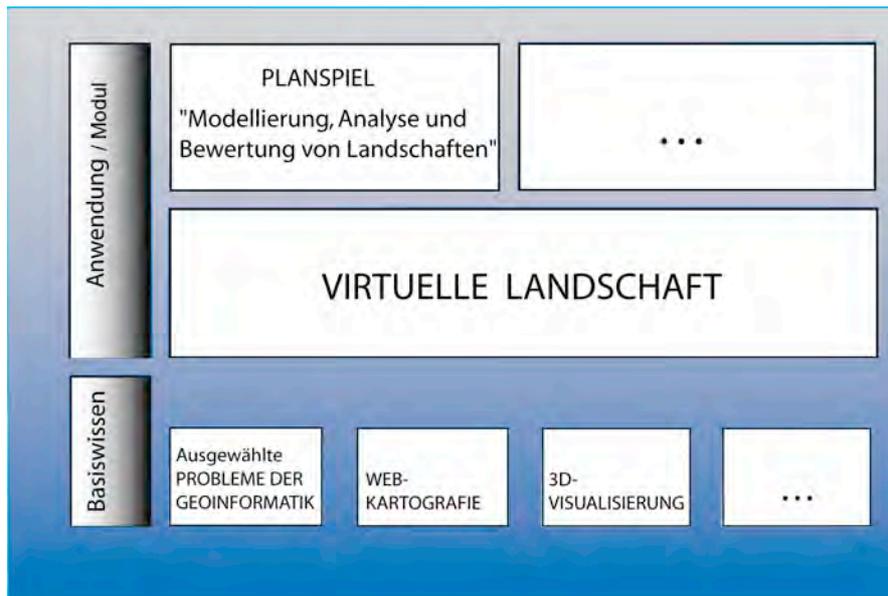


Abb. 1: Konzept der Virtuellen Landschaft

„Module“ aufgesetzt, welche konkrete Anwendungsfälle oder komplexere Übungsaufgaben enthalten. Weiterführende Materialien und Informationen sind in den Modulen enthalten. Die praktische Arbeit wird in der Virtuellen Landschaft ausgeführt. Dazu wird eine Geodateninfrastruktur bereitgestellt, die einerseits strukturiert eine Datenbasis zur Verfügung stellt, diese in 2D und 3D visualisiert und andererseits Funktionalitäten zur Exploration und Analyse bereitstellt. Dabei ist jedoch nicht der volle Funktionsumfang eines Desktop-GIS angestrebt. Dieser entspricht einerseits nicht den Erfordernissen einer web-basierten Lernumgebung, andererseits stellt das Web auch keine optimale Plattform für komplexe Daten-Transaktionsprozesse dar. Vielmehr soll die Virtuelle Landschaft den Einstieg in die Arbeit mit räumlichen Daten erleichtern, sowie fortgeschrittenen Studenten – durch die Konzentration auf inhaltliche, anstatt auf Programmtechnische Fragen – eine Arbeitshilfe zur Lösung von komplexen Problemen sein.

Didaktisch wird auf das handlungsorientierte Konzept gesetzt. Die Vorteile werden bei RIEDL & SCHELTEN (2002) beschrieben. Ihr Plädoyer für das handlungsorientierte Lernen, wird wie folgt begründet: „Jede Handlung ist in sich geschlossen und zielgerichtet. Ihr geht ein geistiges Probanden voraus. Das so entstandene geistige Abbild vergleicht die anschließende reale Handlung mit seiner gedanklichen Vorwegnahme und wirkt auf diesem Weg auf die Handlungsausführung zurück. Auf diesem Weg entstehen neue kognitive Strukturen. Ein Lernen, das ohne konkrete Handlungsvollzüge im geistigen Handeln verbleibt, ist handlungsfern und um wichtige Rückkoppelungsprozesse verarmt.“ (RIEDL & SCHELTEN, 2002, S. 8). Um eben jene Handlungsausführungen zu gewährleisten, wird im Bereich der Lernmaterialien stark auf Interaktionen und eigenständiges Erarbeiten gesetzt. Die Virtuelle Landschaft selbst stellt ein komplexes Interaktionswerkzeug dar, welches reale Handlungen erfordert und diese in virtuelle Handlungen überträgt.

2.1.3 Umsetzung

Um das oben begründete Erfordernis der Handlungsorientierung zu gewährleisten, werden Webseiten auf der Basis von HTML und PHP entwickelt. Somit ist zum Einen die dynamische Erzeugung von Lehrmaterialien gewährleistet. Zum Anderen bietet PHP – eine einfache

Programmiersprache mit großem Funktionsumfang – umfangreiche Möglichkeiten, Interaktionen selbst zu programmieren.

Unter www.gis-zentrum.uni-hannover/elan/ steht bereits der Kurs „Webkartographie“ zur Verfügung. Der Kurs zum Thema „GIS – Internetstrukturen und –Architekturen“ befindet sich derzeit noch in der Erarbeitung.

Auf den Einsatz einer Lernplattform wurde bewusst verzichtet, obgleich der Nutzen einer solchen Umgebung nicht negiert werden soll. Der Hauptnutzen allerdings ist in der Organisation des Lernmaterials und in der Bereitstellung von Werkzeugen zur Kommunikation zwischen Lehrenden und Lernendem, sowie zwischen den Lernenden untereinander zu sehen. Da die Umgebung hauptsächlich zur Unterstützung, d. h. zusätzlich zur Präsenzlehre eingesetzt werden soll, muss die wesentlich zeitaufwendigere digitale Kommunikation nicht den direkten Kontakt und die persönliche Diskussion ersetzen. Somit scheint der technische Betreuungsaufwand für eine Lernplattform gegenüber den genutzten Eigenschaften zu hoch. Außerdem haben Erfahrungen von Projektpartnern gezeigt, dass Entwicklungsstops, Probleme mit Versionen, Fehlen von wichtigen, bzw. Bereitstellung von unnötigen Features oder generelle Unzulänglichkeiten die Arbeit zum Teil sehr erschweren. Es bleibt also den Aufwand gegenüber dem Nutzen abzuwägen. Im Fall der „Werkstatt Virtuelle Landschaft“ wurde diese Frage zugunsten eigener Entwicklungen entschieden.

Im Sinne der Nutzerfreundlichkeit wurden folgende Funktionalitäten in die Lernumgebung integriert:

- Möglichkeit zur linearen Navigation,
- Möglichkeit zum Springen zwischen den Kapiteln eines Kurses, damit Studierende im Sinne des individuellen Vorwissens und Interesses lernen können,
- Tests zur persönlichen Überprüfung des Lernfortschrittes,
- Zuordnung von Quellen und Informationen zu weiterführender Literatur für jede Seite individuell nachgewiesen,
- Möglichkeit zur Generierung einer persönlichen Literaturliste,
- Möglichkeit zur automatischen Erstellung einer persönlichen Druckversion, sowie
- Kontakt zum Betreuer.

Zur Organisation der Materialien steht eine Administrationsoberfläche bereit, die autorisierten Personen das Einrichten und Ändern von Webseiten über ein Formular ermöglicht.

Zur Umsetzung der „Virtuellen Landschaft“ nach dem oben beschriebenen Konzept wird eine Infrastruktur entsprechend dem OGC-konformen Visualisierungsprozess nach dem Cuthbert-Modell (vgl. MAY ET AL., 2003; FITZKE & GREVE, 2002) aufgebaut. Die Idee einer XML- und Service-basierten Infrastruktur wird ausführlich in KATTERFELD & SESTER (2004) erläutert. Danach soll folgenden Anforderungen entsprochen werden:

- Visualisierung in 2D,
- Visualisierung in 3D,
- Grundfunktionalitäten der Exploration und Analyse in 2D (und 3D).

Eine Herausforderung stellt in diesem Zusammenhang die Integration von 2,5D, bzw. 3D-Daten, sowie die Bereitstellung der Analysefunktionen dar.

Für den Bereich der 2D-Visualisierung wurde zunächst ESRI's ArcIMS eingesetzt. Dieser stellt Funktionalitäten für die web-basierte Exploration und Analyse, sowie für die Diskussion über Analyseergebnisse im 2D-Bereich bereit. Um den Anforderungen an eine dynamische Umgebung mit Visualisierungs-, Explorations- und eingeschränkten Analysefunktion in 3D nachzukommen, wird der schon erwähnte XML-basierte Ansatz auf der Basis von SVG und X3D getestet (KATTERFELD & SESTER, 2004).

Als Anwendungsmodul wird exemplarisch ein Planspiel zur Trassenplanung implementiert. Dies passiert in Kooperation mit einem Projektpartner aus dem ELAN-Verbund, dem Institut

für Landespflege und Raumplanung (LAUM) der Universität Hannover. Das Konzept für das Planspiel wird im LAUM entwickelt und die Infrastruktur der web-basierten Geodatenbereitstellung für dieses Anwendungsbeispiel in enger Abstimmung durch die Virtuelle Landschaft ermöglicht.

2.1.4 Einsatz der Lernumgebung

Einsatz finden wird die eLearning-Umgebung in der universitären Lehre, im Sinne von Blended Learning, also zur Unterstützung der Präsenzlehre. Die Zielgruppe stellen Studierende aus verschiedenen Studiengängen der Geowissenschaften, vor allem aber der „Geodäsie und Geoinformatik“, „Geographie“, „Landesplanung und Raumforschung“ sowie der „Angewandten Informatik“ dar. Auch für andere im GIS-Zentrum vertretene Fachgebiete, wie beispielsweise Geobotanik, Wasserbau- und Küsteningenieurwesen oder Theoretische Nachrichtentechnik, stellt die Geoinformatik ein Arbeits-, Lehr- und Forschungsfeld dar. Konkret wird der bereits entwickelte Kurs „Webkartographie“ die Vorlesung „Kartengestaltung“ ergänzen. Weitere web-basierte Lehrmaterialien zu ausgewählten Aspekten der Geoinformatik (z.B. „XML für Geodaten“ und „GIS: Internet-Architekturen und –Strukturen“) werden die Veranstaltung „GIS III“ unterstützen. Beide Veranstaltungen finden am ikg während jedes Wintersemesters statt. Im WS 2004/05 werden die Kurse erstmalig eingesetzt und evaluiert. Studierende des Fachbereiches Landschaftsplanung werden – ebenfalls im nächsten Wintersemester – im Rahmen eines Projektseminars die Planung einer Eisenbahntrasse im Landkreis Hameln-Pyrmont behandeln. Dabei sollen Sie unter Einsatz des handlungsorientierten Lernkonzeptes die Virtuelle Landschaft nutzen, um im Planungsvorgang Geobasisdaten, sowie einen digitalen Landschaftsrahmenplan zu explorieren, analysieren und darüber zu diskutieren. Die Ergebnisse des Entscheidungsprozesses sollen dann wiederum kartographisch und web-basiert in der Virtuellen Landschaft präsentiert werden.

Module zu weiteren Themen – etwas aus dem Bereich der Lehr- und Forschungsaktivitäten der Institute des GIS-Zentrums – sind nicht nur wünschenswert, sondern notwendig, um die Virtuelle Landschaft als Repräsentation der Realität betrachten zu können. Die hier geleisteten Vorarbeiten ermöglichen eine einfache Integration in weitere Module.

2.2 Fernstudienmaterialien Geoinformatik (FerGI)

2.2.1 Ziele des Projektes

Seit Oktober 2003 ist das Institut für Kartographie und Geoinformatik (ikg) mit einer halben wissenschaftlichen Mitarbeiterstelle am Projekt FerGI beteiligt. Dieses Projekt wird im Rahmen des Schwerpunktes *Fernstudium* der Bund-Länder-Kommission für Bildungsplanung und Forschungsförderung jeweils zur Hälfte vom Bundesministerium für Bildung und Forschung und vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur für die Dauer von drei Jahren gefördert.

Das Verbundprojekt setzt sich aus Partnern des Kompetenzzentrums für Geoinformatik (GiN) zusammen. Diese sind das Forschungszentrum für Geoinformatik und Fernerkundung (FZG) der Hochschule Vechta, das Fachgebiet Geographie (Geo) der Universität Osnabrück, das Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik (IAPG) der Fachhochschule in Oldenburg sowie das Institut für Photogrammetrie und Geoinformation (IPI) und das ikg an der Universität Hannover. Mediendidaktisches Wissen wird durch das Kompetenzzentrum für Online Distance Learning (VIA-online) eingebracht, welches durch das Zentrum für Fernstudien und Weiterbildung (ZFW) der Universität Hildesheim vertreten wird.

Ziel von FerGI ist nicht die Erstellung von Materialien für einen kompletten Studiengang, sondern die Vertiefung ausgewählter Spezialthemen der Geoinformatik. Die hierbei entstehenden Lernmodule sollen sowohl in der Ausbildung an Hochschulen, als auch in der Weiterbildung eingesetzt werden. Von den Expertenteams an den beteiligten Hochschulinstituten werden hierzu kleine, flexible Module zu ausgewählten Themen erstellt, die einen Umfang von ca. 0,5 bis 3 ECTS-Punkten aufweisen. Das ikg konzentriert sich mit Modulen zur Kartengestaltung, automatischen Generalisierung sowie 3D-Modellierung und -visualisierung insbesondere auf die Präsentation von Geoinformationen.

2.2.2 Umsetzung

Um eine Weiter- und Wiederverwendbarkeit dieser Module zu gewährleisten, ist auf die strikte Trennung zwischen den Inhalten und deren Erstellung sowie anderen Funktionalitäten zu achten (Schiewe 2004). Die Erstellung der Materialien erfolgt zunächst im HTML-Format. Die verfassten Materialien werden dann in eine gemeinsame Lernplattform eingestellt. Zur Zeit ist diese Plattform LearningSpace von Lotus Notes. Hierin finden sich verschiedene Kursdatenbanken, welche die ganzheitliche Organisation eines eLearning-Kurses ermöglichen. Hierzu gehören die Lernmaterialien, Möglichkeiten zur Kommunikation und Diskussion mit anderen Studierenden oder dem Tutor, ein Zeitplan, sowie ein Prüfungsmanager. Ein großer Vorteil dieser Lernumgebung ist die Möglichkeit der Offline-Nutzung der Materialien. Näheres zur Modulentwicklung unter Lotus Notes LearningSpace und den dabei auftretenden Problemen findet sich bei GRENUS & ZANDER (2004). Insgesamt werden im Rahmen von FerGI 18 Module erstellt, welche sich in fünf Themenbereiche gliedern (Tab. 1).

ERFASSUNG
<ul style="list-style-type: none"> • Datenaufnahme mit GPS und Pencomputer (Geo) • Airborne Laserscanning (FZG)
VERWALTUNG
<ul style="list-style-type: none"> • Objektrelationale Datenbanksysteme (Oracle) (IAPG) • Geodatenstandards (IAPG) • Aufbau eines Geodatenservers (IAPG) • Geodatenbanksysteme (Oracle Spatial) (IAPG) • Internet GIS (Geo)
ANALYSE
<ul style="list-style-type: none"> • DGM Interpolationsmethoden (ikg) • Integrated Sensor Orientation (IPI) • Photogrammetric Image Processing (IPI) • Model Based Image Analysis (IPI) • Segmentierungsverfahren in der Fernerkundung
PRÄSENTATION
<ul style="list-style-type: none"> • 3D-Modellierung und -Visualisierung(ikg) • Automatische Generalisierung (ikg) • Kartengestaltung (ikg)
ANWENDUNGEN
<ul style="list-style-type: none"> • Aufbau eines kommunalen Informationssystems (Geo) • Analyse von Netzwerken (Geo) • Fusion von Fernerkundungs- und GIS-Daten (FZG)

Tab. 1: Themen der eLearning Module von FerGI

2.2.2 Einsatz der Lernmodule

Die ersten Module sollen ab Oktober 2004 zum Einsatz kommen. Hierbei wird an jedem Standort zunächst das selbst erstellte Modul getestet. Beim ikg wird dies das derzeit in der Entwicklung befindliche Modul „Kartengestaltung“ sein, welches im Zusammenhang mit einer im Wintersemester 2004/05 stattfindenden Vorlesung eingesetzt wird. Die erstellten Lehrmaterialien sollen um interaktive Elemente erweiterte Teile der Vorlesung im Selbststudium ermöglichen.

Im Rahmen einer Lehrveranstaltung am FZG wurde bereits der Prototyp des in Vechta erstellten Moduls Airborne Laserscanning eingesetzt. Erste Erkenntnisse aus diesem Einsatz werden bei SCHIEWE ET AL. (2004) beschrieben. Hinweise zu möglichen Problemen mit der Lernumgebung sowie Kommentare von Seiten der Studierenden können somit in die Vorbereitung der eigenen Veranstaltung einfließen.

3 Zusammenfassung

Der Artikel hat die Konzepte und Umsetzung von zwei, in der Entwicklung befindlichen e-Learning-Projekten beschrieben. Durch die Mitarbeit in unterschiedlichen Projekten an einem Standort stellt sich nachdrücklich die Frage nach der Austauschbarkeit der Materialien. Zwar weisen ELAN und FerGI unterschiedliche Zielgruppen auf, dennoch scheint punkthafter Materialienaustausch sinnvoll, etwa wenn Module in der Virtuellen Landschaft auf die Vermittlung von Spezialthemen angewiesen sind, oder ein Vertiefungsthema aus FerGI einzelne Elemente (Assets) aus ELAN sinnvoll integrieren soll. Der Austausch von kleinsten Einheiten wie Animationen, Abbildungen oder Literatur wird somit in Zukunft von Bedeutung sein. Einen Ansatz zur Handhabung eines solchen Austausches bildet der im Rahmen von „geoinformation.net“ am IKG der Universität Bonn entwickelte „Lecture Builder“. Dieses Tool ermöglicht die Struktur vorhandener Lehrmodule in „geoinformation.net“ auf die Ebene einzelner Folien herunterzubrechen, eigene Materialien zu integrieren und diese mit Materialien aus dem Folienpool zu kombinieren (DÖRSCHLAG ET AL., 2004).

Momentan wird in ELAN und FerGI in unterschiedlichen Umgebungen entwickelt. Die „Werkstatt Virtuelle Landschaft“ arbeitet ohne, FerGI innerhalb einer Lernplattform. Die Gründe wurden oben erläutert. Da PHP serverseitig HTML generiert, arbeiten beide Projekte HTML-basiert. Somit ist der Austausch technisch grundsätzlich gewährleistet, wenngleich Optimierungen auf das jeweilige System verloren gehen. Natürlich werden dabei Einschränkungen zu beachten sein. Dies betrifft vor allem die angestrebte Offline-Nutzung von Lotus Learningspace. Dynamisch erzeugte Elemente aus ELAN können beispielsweise offline nicht verfügbar sein. Auch für die online-Nutzung wird in einigen Fällen keine wirkliche Einbindung der ELAN-Materialien möglich sein. So würde beispielsweise bei der Arbeit mit der Virtuellen Landschaft ein Verweis auf externe Seiten notwendig werden. Andersherum können zwar die HTML-Seiten aus FerGI mit mäßigem Aufwand in die „Werkstatt Virtuelle Landschaft“ importiert werden. Allerdings stehen danach natürlich die Kommunikations- und Diskussionsmöglichkeiten, sowie der Prüfungsmanager nicht mehr zur Verfügung.

Die hier auf Institutsebene diskutierte Frage der Austauschbarkeit bewegt derzeit viele aktuelle und abgeschlossene Projekte. Die Bereitschaft hierzu ist in den meisten Projekten gegeben. Daraufhin hat sich im Frühjahr diesen Jahres auf dem Workshop „eLearning in Geoinformatik und Fernerkundung: - Stand und Perspektiven“ in Vechta die „Projektübergreifende eLearning-Initiative Geoinformatik“ unter Federführung von PD Dr.-Ing. Jochen Schiewe gegründet (PELIG, http://www.fzg.uni-vechta.de/mitarbeiter/schiewe/dgpf_pelig.htm). Ziel der Initiative ist die Sondierung von Möglichkeiten zur Kooperation von eLearning-Projekten

im Bereich Geoinformatik zur nachhaltigen Pflege und Nutzung der Materialien und Lernumgebungen. Daraus ergibt sich die Anforderung, Maßnahmen zur verbesserten Austauschbarkeit der Materialien zu identifizieren oder zu entwickeln. Konkrete technische Voraussetzungen sind zu definieren, und Verfahren zur Qualitätssicherung zu diskutieren.

4 Literatur

- BODE, T., DEVOOGHT, I., KOLBE, T.H., STEINRÜCKEN, J. & M. Won (2004): GeoCafé – Kommunikationszentriertes Gruppenlernen von Methoden der raumbezogenen Datenverarbeitung. In: Plümer, L. & H. Asche (2004): Geoinformation – Neue Medien für eine neue Disziplin.
- DÖRSCHLAG, D., QUADT, U. & L. PLÜMER (2004): Erzeugung eigener Vorlesungen mit geoinformation.net. In: Plümer, L. & H. Asche (2004): Geoinformation – Neue Medien für eine neue Disziplin.
- FITZKE, J. & K. GREVE (2002): Umweltkarten im Internet: Das Potential von WebMap-Services. In: Kartographische Nachrichten, 6.
- GLÄBER & THÜRKOW (2004): Virtuelle Landschaften und Exkursionen - innovative Tools in der geowissenschaftlichen Aus- und Weiterbildung. Beitrag zum Workshop „eLearning in Geoinformatik und Fernerkundung - Stand und Perspektiven-,, 16./17.02.2004 in Vechta.
- GRENDUS, B. & M. ZANDER (2004): Entwicklung von eLearning-Modulen unter Lotus Notes LearningSpace. In: Dokumentation zum DGPF/DDGI/GiN-Workshop „eLearning in Geoinformatik und Fernerkundung- Stand und Perspektiven,, S. 19, Vechta.
- KATTERFELD, C. & M. SESTER (2004): Desktop Virtual Reality In eLearning Environments. Beitrag zur ISPRS-Konferenz 12.-23.07.2004, Istanbul (eingereicht).
- LORUP, J.E. & S. BLEISCH (2003): Schweizweite GIS-Ausbildung mit GITTA - Aufbau und Organisation. In: eLearning in Geoinformatik und Fernerkundung. Wichmann, Heidelberg.
- MAY, M., SCHMIDT, B., STREIT, U. & C. UHLENKÜKEN (2003): Web-Service-basierte 3D-Visualisierung im Umfeld der Raumplanung. In: CORP-Tagungsband, 2003.
- METTERNICHT, G. (2003): Expanding Distance Education In The Spatial Sciences. In: Proceedings of the 21th International Cartographic Conference (ICC), Durban.
- MÜLLER, M. (2004): gimolus – GIS-und modellgestützte Lernmodule für umweltwissenschaftliche Studiengänge. In: Plümer, L. & H. Asche (2004): Geoinformation – Neue Medien für eine neue Disziplin.
- SCHIEWE, J. (Hrsg) (2004.): eLearning in Geoinformatik und Fernerkundung. Wichmann-Verlag.
- SCHIEWE, J. (2004): Fernstudienmaterialien Geoinformatik (FerGI): Konzeption und erste Erfahrungen. In: Schiewe, J. (Hrsg.): eLearning in Geoinformatik und Fernerkundung. Wichmann-Verlag.
- SIMONIS, I. & S. MERTEN (2004): Die Geodateninfrastruktur des Webportals geoinformation.net. In: Plümer, L. & H. Asche (2004): Geoinformation – Neue Medien für eine neue Disziplin.
- RIEDL, A. & A. SCHELTEN (2002): Handlungsorientiertes Lernen.
<http://www.paed.ws.tum.de/downloads/hu-rie-sche.pdf>
- WEIPPERT, H. & D. FRITSCH (2002): Development of a GIS-Supported Interactive „Remote Sensing“ Learning Module. In: Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung – Supplement, 9.

Digitale Photogrammetrie am PC – Neue Ansätze für die Ausbildung

WILFRIED LINDER

Zusammenfassung: Es wird ein photogrammetrisches Auswertesystem vorgestellt, welches im besonderen Hinblick auf Anwender aus Geowissenschaften entwickelt wurde und auf jedem handelsüblichen PC betrieben werden kann. Die Kombination aus einfach zu bedienender Software, einem Arbeitsbuch mit durchgerechneten Beispielen und einem Internet-Tutorium bietet auch Anfängern einen schnellen und ermutigenden Einstieg in die Thematik.

1 Problemstellung

Bedenkt man die vielfältigen Möglichkeiten der Photogrammetrie zur Erfassung räumlicher Daten, so erscheint es erstaunlich, wie wenige der potentiellen Anwender in verschiedensten Fachbereichen und Berufen diese Techniken bislang nutzen. Und das selbst in den Industrienationen – von Ländern der sogenannten Dritten Welt ganz zu schweigen. Aus der Sicht des Autors gibt es hierfür verschiedene Gründe. Zunächst einmal gilt die Photogrammetrie immer noch als kompliziert und teuer, es wird als Voraussetzung für gute Ergebnisse das Vorhandensein erheblichen Fachwissens vermutet, und schließlich dürfte es viele potentielle Anwender geben, die schlicht noch nie etwas von den mächtigen Möglichkeiten dieser Technik gehört haben.

Nun gab es in der Vergangenheit ja in der Tat erhebliche Hemmnisse für den Einsatz photogrammetrischer Auswertetechniken – insbesondere waren die benötigten Geräte sehr teuer und erforderten zum Teil erhebliche Einarbeitungszeit und solides Fachwissen. Vorurteile tun ihr übriges: „Photogrammetrie ist kompliziert, nicht nachvollziehbar, und nur Experten können reproduzierbare Ergebnisse erzielen“, wie WIGGENHAGEN & RAGUSE (2003) häufig vorgetragene Kritikpunkte bzw. Vorbehalte zusammenfassen. Andererseits bieten heute jedoch Standard-PCs ein enormes Leistungsspektrum, und Scanner für die Übernahme von Bildmaterial (Film bzw. Papier) ebenso wie Digitalkameras sind weit verbreitet und preiswert.

2 Konzept

Um die Photogrammetrie einer breiteren Schicht von Nutzern nahe zu bringen, wurde ein Komplettpaket aus Software und Unterrichtsmaterialien entwickelt (Abb. 1). Das Programmsystem besteht aus drei Komponenten, einem Basisprogramm zur Verarbeitung räumlicher Daten vorzugsweise auf Rasterbasis (LISA BASIS), einer neu entwickelten digitalen Stereo-Arbeitsstation für alle photogrammetrischen Standardanwendungen (LISA FOTO) sowie dem Bündelblock-Ausgleichsprogramm BLUH (JACOBSEN 2003) der Universität Hannover. Damit steht ein leistungsfähiges Softwarepaket zur Verfügung, das auf jedem handelsüblichen PC betrieben werden kann. Das Bildmaterial kann z.B. von einer Digitalkamera stammen oder mittels Standard-Flachbettscannern übernommen werden. Einzige „Spezialhardware“ ist eine einfache Rot-Grün-Brille zur Stereobetrachtung nach dem Anaglyphenverfahren (allerdings können auch Shutterbrillen eingesetzt werden) und eine 3-Tasten-Maus zur ergonomischen Steuerung der Funktionen im Stereobetrieb. Der Vertrieb von Software und Updates erfolgt ausschließlich via Internet und ist daher problemlos fast weltweit möglich.

Das zum System gehörende Buch „Digital Photogrammetry – Theory and Applications“ (LINDER 2003) enthält eine Einführung in die Theorie sowie einige im Schwierigkeitsgrad

aufeinander aufbauende Tutorien. Die Software, die Übungsdatensätze sowie die wichtigsten Zwischenergebnisse befinden sich auf der dem Buch beiliegenden CD-ROM. Die Kombination aus Buch, Programm und Beispieldaten ist gut für ein Selbststudium geeignet und folgt dem motivierenden Ansatz „Learning by doing“. Im Rahmen einer vom Autor mitbetreuten Dissertation wird derzeit als weitere Komponente ein Internet-Tutorium zur digitalen Photogrammetrie entwickelt, welches interessierten Nutzern kostenfrei zur Verfügung steht.

Die Grundfunktionen, die eine sogenannte *Digitale Photogrammetrische Arbeitsstation* (DPAS) beinhalten muss, sind in Abb. 2 wiedergegeben, welche die Prozesskette von der Bildaufnahme bis hin zu verschiedenen Endprodukten verdeutlicht (vgl. HEIPKE 1995, WALKER & PETRIE 1996, SCHENK 1999, PLUGERS 2000):

- Import der digitalen Bilder (von Digitalkamera oder Scanner)
- Möglichkeit der Kalibrierung von Digitalkamera bzw. Scanner
- Bestimmen der inneren Orientierung bei Bildern von analogen Kameras
- Bestimmen der äußeren Orientierung, entweder direkt über Passpunktmessung (räumlicher Rückwärtsschnitt) oder indirekt über Bildkoordinatenmessung (ATM, manuell oder automatisch) und anschließender Blockausgleichung
- Modelldefinition mit Korrektur der y-Parallaxen
- Ableiten von Oberflächenmodellen durch Bildkorrelation (matching)
- Erzeugen von Orthobildern und Mosaiken
- Aufnahme von Vektordaten (Punkte, Linien, Flächen) durch Digitalisieren im Stereomodell, ggf. mit angekoppeltem DGM, oder im orientierten Einzelbild oder im Orthobild.

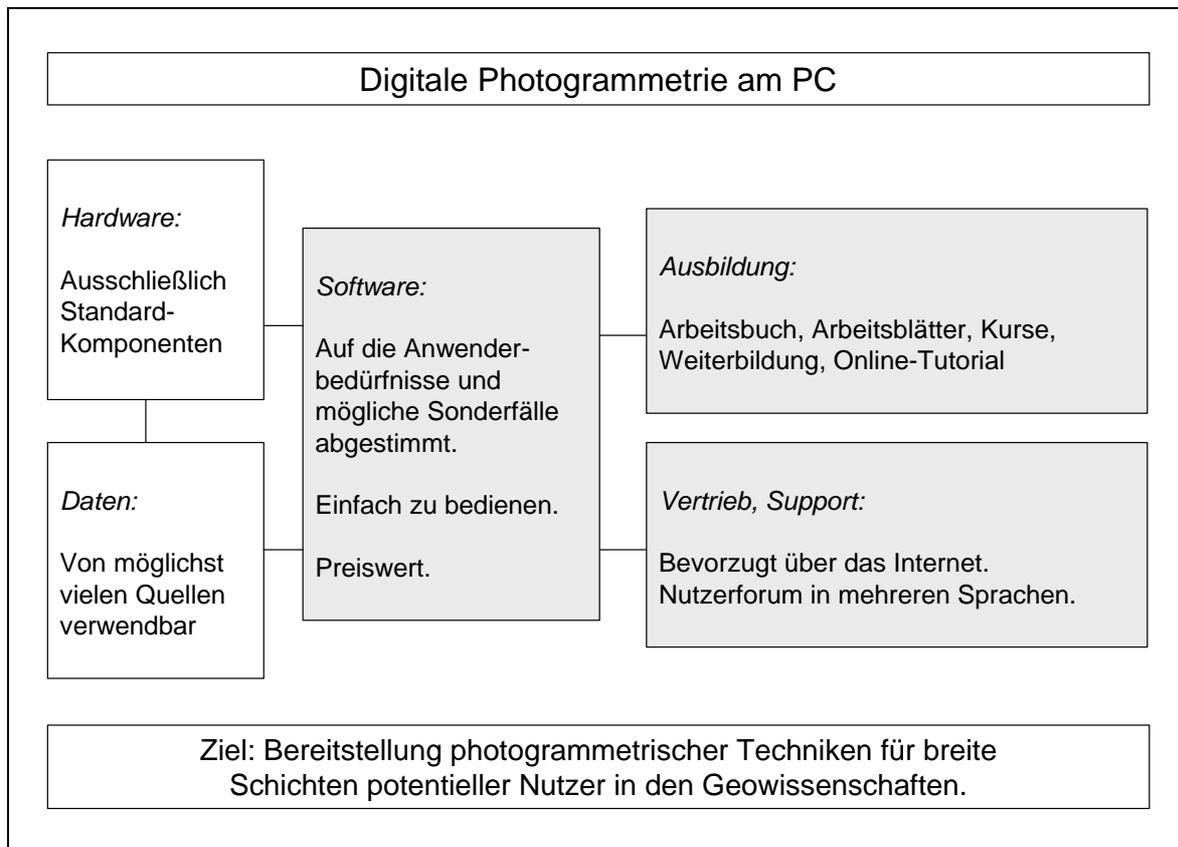


Abb. 1: Gliederung des vorgestellten Systems zur digitalen Photogrammetrie. Die grau hinterlegten Felder zeigen die Arbeitsschwerpunkte.

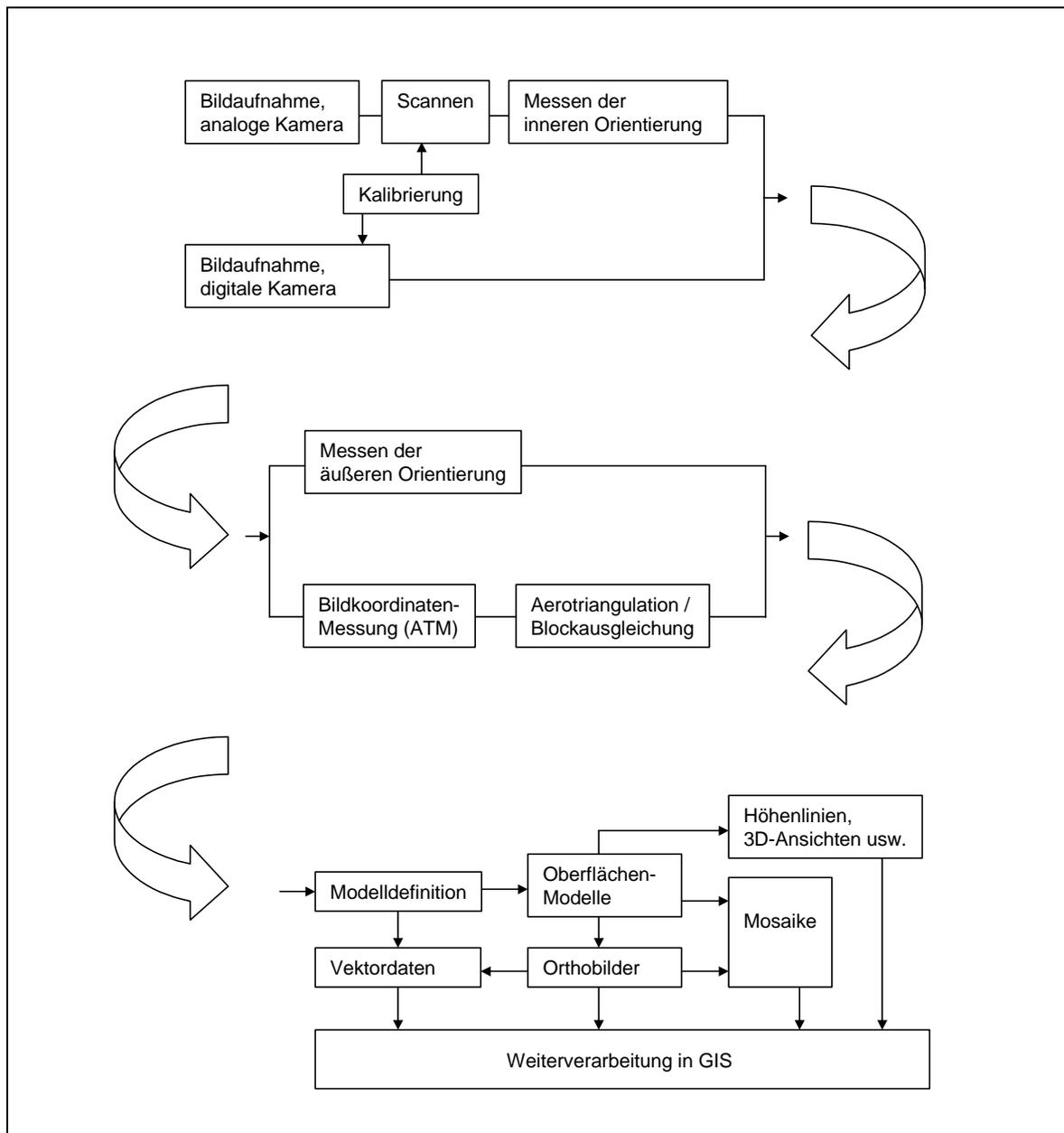


Abb. 2: Typischer Arbeitsablauf (Prozesskette) in der digitalen Photogrammetrie. Die Endprodukte (Vektordaten, Orthobilder usw.) können dann z.B. in ein GIS übernommen werden.

3 Ziele

Bei der Entwicklung der Software wurden folgende Ziele verfolgt:

Entwicklung eines preiswerten und leistungsstarken Programms, welches sich durch leichte Bedienbarkeit, hohe Fehlertoleranz, Automatik dort wo sinnvoll, eine klare und logische Menüführung, eine gute Online-Hilfe sowie aussagekräftige Fehlermeldungen auszeichnet. Die Software sollte alle heute üblichen Standardfunktionen beinhalten (Kap. 2), daneben aber auch mit diversen Sonderfällen bzw. Problemen zurechtkommen. Dabei wurden auf algorithmischer Seite keinerlei Kompromisse gemacht – jeder neue, bessere Rechner, jeder bessere Scanner, jedes bessere Bildmaterial führt zu besseren Ergebnissen, und sind die finanziellen Möglichkeiten für eine wirklich gute Hardware irgendwann einmal vorhanden, lassen sich wirklich hochwertige Ergebnisse erzielen.

In Anlehnung an die Terminologie der analytischen Photogrammetrie könnte dabei auch der Begriff „Digitale Photogrammetrie 2. Ordnung“ verwendet werden. Damit aber kein falscher Eindruck entsteht: Es geht *nicht* um *Photogrammetrie zweiter Klasse*! Im Gegenteil: Um die vielfältigen Probleme, die beim Einsatz relativ einfacher Hardware bzw. ungünstiger Ausgangslage bezüglich des Datenmaterials entstehen können, zu handhaben und dennoch zu überzeugenden Ergebnissen zu gelangen, sind teils recht aufwendige Verfahren entwickelt worden. Zu den Zielen dieser Arbeit gehörte, aus einem Minimum an (technischem) Aufwand ein Maximum an Qualität zu gewinnen getreu dem Motto „Wenig ist mehr als gar nichts!“.

Für die Ausbildung wurden gut aufbereitete Beispiele bzw. Unterrichtspakete (Tutorien) entwickelt, die so weitgehend wie möglich auch zum Selbststudium geeignet sind. Diese wurden in semesterbegleitenden Veranstaltungen ebenso wie in Kompaktkursen erprobt und die dort gemachten Erfahrungen wiederum in die Tutorien eingearbeitet. Ferner konnten Erfahrungen mit dem Training von Ausbildern gesammelt werden, die dann als Multiplikatoren ihr vertieftes Wissen vor Ort weitergeben sollen. Eine Maßgabe dabei war immer „Soviel Theorie wie nötig, so wenig wie möglich“, um gerade Anfängern die Scheu vor dieser doch recht komplexen Thematik zu nehmen und sie andererseits durch schnelle erste Erfolge und faszinierende Ergebnisse für vertiefende Theorie zu motivieren.

4 Ein Beispiel

Anhand eines kleinen Beispiels aus dem Nahbereich soll die Verwendbarkeit des vorgestellten Systems auch unter erschwerten Bedingungen verdeutlicht werden. Ein Fahrzeugmodell (Abb. 3) wurde aus zwei Positionen mit einer handelsüblichen Digitalkamera mit Varioobjektiv (Rollei dp 3210) aufgenommen. Für diese nicht-kalibrierte Kamera lagen kaum Informationen vor – insbesondere waren die Brennweite, die Pixelgröße des Chips, die Lage des Bildhauptpunktes sowie die Objektivverzeichnung unbekannt.

Aus den Angaben zur Chipgröße (Auflösung 2048 x 1536 Pixel, Diagonale 1 / 2,7“) konnte zunächst die Pixelgröße zu ca. 2,5 μm bestimmt werden. Die Aufnahmen erfolgten bei leicht konvergent angeordneten Kamerapositionen in der Weitwinkelseinstellung ($f = 5,7 \text{ mm}$) mit abgeschaltetem Autofocus, der Bildhauptpunkt wurde mit (0, 0) angenommen.

Als Passpunkte wurden die Ecken der Aluminiumprofile verwendet, so dass 6 gut verteilte räumliche Passpunkte vorlagen, womit die äußeren Orientierungen der beiden Bilder sicher ermittelt werden konnten mit Standardabweichungen der Restfehler an den Passpunkten von ca. 5 μm entsprechend rund 2 Pixel. Mit Hilfe einiger manuell gemessener, gut über das Modell verteilter Punkte ließen sich die verbleibenden y-Parallaxen auf weniger als ein Pixel minimieren.

Im so vorbereiteten Stereomodell können nun beliebige Objektpunkte dreidimensional gemessen und registriert werden. Als Beispiel zeigt Abb. 4 einen Teil der aufgenommenen Konturen der Fahrzeugfront. Die Punkte sind als einfache ASCII-Datei (x, y, z) abgelegt und können beispielsweise zur Weiterverarbeitung in Grafik- oder CAD-Programmen in das Format DXF exportiert werden.



Abb. 3: Das Fahrzeugmodell. Die Ecken der beiden Aluminiumprofile wurden als Passpunkte verwendet.

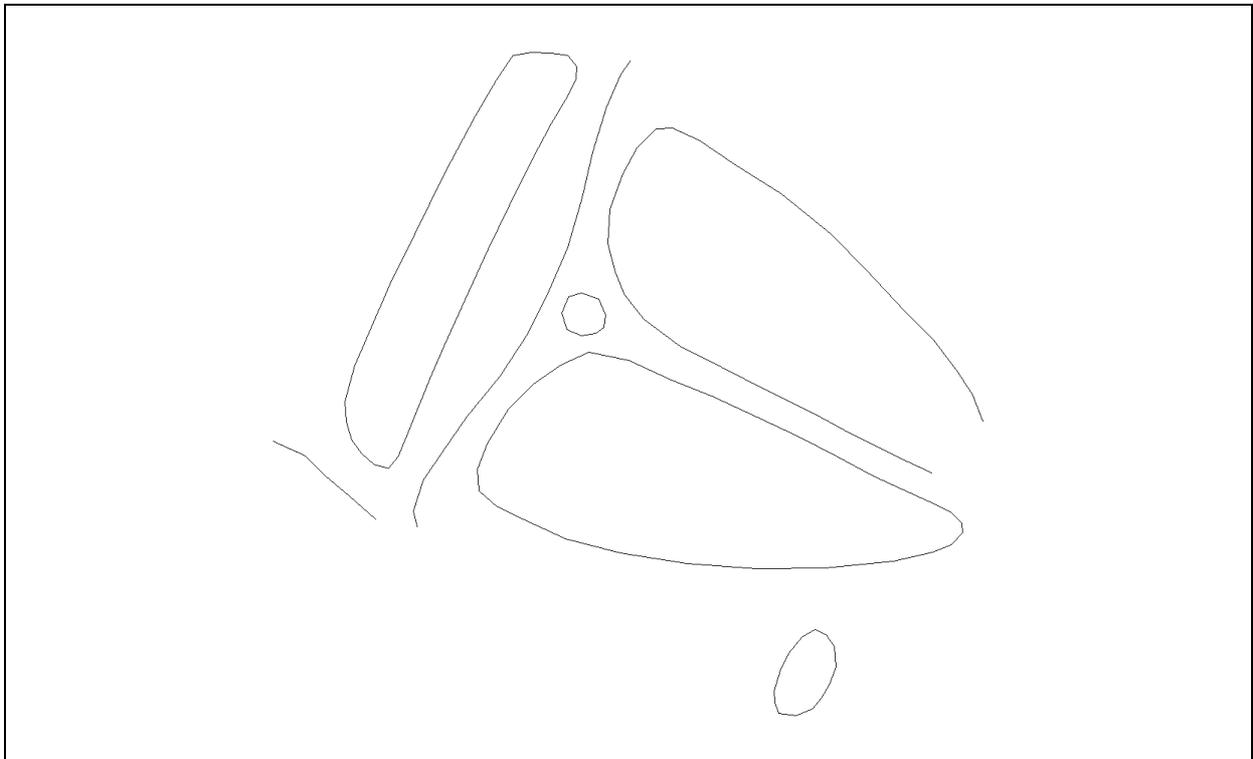


Abb. 4: Digitalisierte Konturen, Aufsicht.

5 Adressen

Testversionen der vorgestellten Software sind zum freien Herunterladen verfügbar unter <http://www.ipi.uni-hannover.de/lisa/>. Das von Frau U. Günther entwickelte Internet-Tutorium findet sich unter <http://www.khk.uni-duesseldorf.de/digigramm/>.

6 Literatur

- HEIPCE, C. (1995): Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen. Habilitation. DGK-C 450, München, 111 S.
- JACOBSEN, K. (2003): Programmbeschreibung BLUH. Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI), Universität Hannover.
- LINDER, W. (2003): Digital Photogrammetry – Theory and Applications. Heidelberg, Berlin, New York, 189 S und CD-ROM.
- PLUGERS, P. (2000): Product Survey on Digital Photogrammetric Workstations. GIM International, Vol. 7, S. 76-81.
- SCHENK, T. (1999): Digital Photogrammetry, Volume I. Terra Science, Laurelville, 428 S.
- WALKER, A.S. & PETRIE, G. (1996): Digital Photogrammetric Workstations 1992-96. ISPRS congress Vienna. IAPRS, Vol. XXXI, Teil B2, S. 384 – 395.
- WIGGENHAGEN, M. & RAGUSE, K. (2003): Entwicklung von Kenngrößen zur Qualitätsbeurteilung optischer Prozessketten. PFG, H. 2, S. 125-134.

Verbesserte Ableitung von Geländemodellen aus der digitalen Bildzuordnung

CHRISTOPH BAUERHANSL¹, ROLAND WÜRLÄNDER², WOLFGANG RIEGER³

Zusammenfassung: Bei der Modellierung der Erdoberfläche ist es wichtig, zwischen Oberflächenmodellen, die ausschließlich den Boden repräsentieren, und solchen, die auch künstliche Bebauung und Bewaldung beinhalten, zu unterscheiden. Oft ist nur das Gelände ohne Kunstbauten und Vegetation interessant. Diese Arbeit befasst sich mit der Aufgabe, automatisch photogrammetrisch gewonnene digitale Geländemodelle von diesen Einflüssen zu befreien. Die Methode, die dazu angewendet wird, hat sich bereits bei der Bearbeitung von Laserscanner-Daten bewährt. Es handelt sich um die im Programmsystem SCOP++ implementierte Methode der hierarchischen robusten linearen Prädiktion. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt in der Untersuchung dieser Methode für die Bearbeitung und Verbesserung von Geländemodellen, die automatisch mittels digitaler Bildzuordnung erstellt wurden. Als Abschluss werden die Ergebnisse einiger bearbeiteter Beispiele präsentiert.

1 Einleitung

Digitale Geländemodelle (DGMe) sind wichtige Bestandteile in Geographischen Informationssystemen und werden für viele Gebiete aus Wissenschaft und Praxis benutzt. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, ein DGM darzustellen. Die einfachste Datenstruktur ist eine Menge an Höhen in einem regelmäßigen Gitter. Ist eine qualitativ hochwertige Geländebeschreibung das Ziel, kann ein hybrider Raster verwendet werden (KRAUS, 2000). Dieser enthält nicht nur Punkthöhen sondern auch geomorphologische Elemente wie Geländekanten, Formlinien oder markante Höhepunkte. Die Höhenwerte für die Gitterpunkte können nicht direkt gemessen werden. Sie müssen aus den Basisdaten, die in der Regel eine unregelmäßig verteilte Punktwolke darstellen, ermittelt werden. Dazu dienen Interpolationsmethoden wie die Lineare Prädiktion oder die Interpolation mit finiten Elementen (KRAUS, 2000). Die Basisdaten können auf unterschiedliche Art und Weise ermittelt werden (z. B. durch manuelle photogrammetrische Messung in einem Stereobildpaar oder durch Methoden der Fernerkundung). Um die Erstellung eines DGM aus digitalen Luftbildern zu automatisieren, wurden Methoden der digitalen Bildzuordnung (Image Matching) entwickelt und bereits erfolgreich angewandt (GÜLCH, 1994; KRZYTEK & ACKERMANN, 1995). Eine weitere Methode, mit der ein DGM erstellt werden kann, ist das flugzeuggetragene Laserscanning (airborne laser scanning, ALS) (KRAUS, 2000).

Die Punktwolken, die durch Methoden des Image Matchings und des ALS erstellt werden, enthalten nicht nur Bodenpunkte, sondern auch Nicht-Bodenpunkte auf Gebäuden, Vegetation oder anderen Objekten. Ein Modell, das aus diesen Daten mittels Interpolation erzeugt

¹ DI Christoph Bauerhansl, Christian Doppler-Labor 'Spatial data from Laser Scanning and Remote Sensing'

am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, Gusshausstrasse 27-29, 1040 Wien, e-mail: cba@ipf.tuwien.ac.at.

² DI Roland Würlländer, Ingenieurkonsulent für Vermessungswesen Dipl.-Ing. K. Wenger Oehn, Franz-Josef-Str. 33, A-5020 Salzburg, e-mail: office@wenger-oehn.at.

³ DI Dr. techn. Wolfgang Rieger, Vermessung AVT, Zweigniederlassung Wien, Loquaiplatz 12/4, 1060 Wien, e-mail: wien@avt.at.

wird, ist noch kein DGM, sondern muss vorerst als digitales Oberflächenmodell (DOM) bezeichnet werden. Für viele Anwendungen ist es sinnvoll, den Einfluss der Nicht-Bodenpunkte zu beseitigen und ein Modell zu erstellen, das ausschließlich das Gelände beinhaltet.

Die Methode der hierarchischen robusten linearen Prädiktion wurde bereits erfolgreich bei der Verbesserung von DOMen, die mittels Laserscanning erfasst wurden, angewandt (KRAUS & PFEIFER, 1998; BRIESE et al., 2002). In dieser Arbeit soll untersucht werden, inwieweit diese Methode für die Verbesserung von DOMen, die durch Image Matching erstellt wurden, geeignet ist. Zunächst werden die Eigenschaften eines mit Methoden der merkmalsbasierten Bildzuordnung erstellten DOMs erläutert und anschließend wird die Anpassung der Filtermethode an die Eigenschaften der hier verwendeten Basisdaten beschrieben. Abschließend werden die Ergebnisse für unterschiedliche Gelände- und Landbedeckungstypen präsentiert.

2 Erstellung digitaler Geländemodelle (DGMe) mit Methoden des Image Matchings

In dieser Arbeit wurde das Programm MATCH-T der Firma INPHO GmbH (INPHO, 2003) zur Erstellung eines DGMs verwendet. MATCH-T verwendet Methoden der merkmalsbasierten Bildzuordnung, um eine dichte Punktwolke zu erzeugen. Aus dieser Punktwolke wird ein regelmäßiges Höhengitter mit Hilfe der Interpolation mit finiten Elementen berechnet. Dabei werden robuste Methoden angewandt, um falsche Zuordnungen von Punkten zu eliminieren (KRZYSTEK & ACKERMANN, 1995). Das Ziel dieser Arbeit war, ein DGM ohne Gebäude und Vegetation zu erstellen. In MATCH-T sind mehrere Parameter implementiert, mit deren Hilfe man die Dichte der gematchten Punkte und den Grad der Glättung bei der Interpolation des Höhengitters kontrollieren kann: Die *Gitterweite* des interpolierten Rasters, der *Geländetyp* (*flat, undulating, mountainous*), die *Glättung* (*low, medium, high*), die *Dichte der Originalpunkte* und *Genauigkeiten* von geomorphologischen Elementen wie Geländekanten oder Formlinien. Der Anwender kann mit diesen Parametern steuern, inwieweit der resultierende Höhenraster das ‚reine‘ Gelände ohne Häuser und Bäume darstellen soll (SUMMIT EVOLUTION, 2001). Im Allgemeinen liefert MATCH-T digitale Oberflächenmodelle von guter Qualität. Soll ein DGM erstellt werden, liefert das Programm jedoch nur gute Ergebnisse, wenn die Gitterweite nicht zu klein im Vergleich zu Bereichen, in denen nur Nicht-Bodenpunkte vorhanden sind, gewählt wird. Einzelbäume oder einzelne kleinere Häuser können beseitigt werden, wenn die Gitterweite in einem Bereich zwischen 5 und 10 Metern gewählt wird. Um ein genaueres DGM zu erhalten, muss die Gitterweite aber kleiner gewählt werden. In diesem Fall bleiben Häuser und Vegetation im Modell. Abbildung 1 zeigt ein DOM, das mit MATCH-T und einer Gitterweite von 1.25 Metern erstellt wurde. Die im Modell verbliebenen Gebäude sind klar zu erkennen.

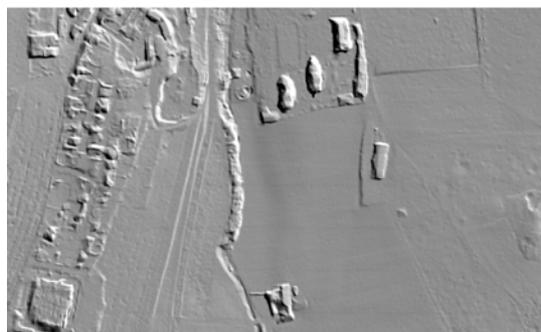


Abb. 1: Schummerung eines MATCH-T-Höhenrasters; Bereich im Osten von Eggenburg.

Die Ergebnisse sollten nun mit Hilfe der hierarchischen robusten linearen Prädiktion verbessert werden. Die Erfahrungen, die mit dieser Methode bei der erfolgreichen Filterung von ALS-Daten gemacht wurden, gaben Grund zur Annahme, dass es auch möglich sein sollte, Bäume und Gebäude in mittels Image-Matching erstellten DOMen zu eliminieren.

3 Hierarchische Robuste Lineare Prädiktion zur Verbesserung von DGMen aus digitaler Bildzuordnung

In dieser Arbeit wurde das Programm SCOP++ (SCOP, 1999) verwendet, um ein hybrides Raster-DGM mittels linearer Prädiktion auf Basis unregelmäßiger Punkt- und Vektordaten zu erstellen. Bei dieser Methode wird angenommen, dass die Höhen der Geländepunkte nach Abspaltung eines Trends korreliert sind. Die Korrelation ist dabei eine Funktion der horizontalen Punktdistanz (KRAUS, 2000). Die lineare Prädiktion ist anfällig gegenüber groben Fehlern. Deshalb musste ein Ansatz gefunden werden, der die Methode robuster macht. Die hierarchische robuste Interpolation wurde ursprünglich zur Erstellung eines DGM aus ALS-Daten entwickelt. Die Beseitigung grober Fehler und die Abschätzung des Geländes erfolgen bei dieser Methode gleichzeitig. Zur Beschreibung der Methode sei auf die Literatur verwiesen (KRAUS & PFEIFER, 1998; BRIESE et al., 2002).

3.1 Beschreibung der Daten

Die Basisdaten in dieser Arbeit sind ein Punktraster, der mit einer Interpolation mit finiten Elementen aus einer gematchten Punktwolke mit dem Programm MATCH-T berechnet wurde.

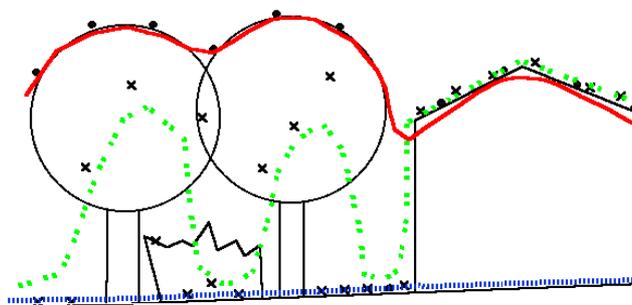


Abb. 2: Unterschiedliche Basisdaten von Matching (Punkte) und ALS (Kreuze) und daraus abgeleitete DOME; blaupunktete Linie = DGM.

Abbildung 2 zeigt die unterschiedlichen Punktdaten, die mit Matching- und ALS-Methoden erzeugt werden. Die punktförmigen Symbole stellen die von der gematchten Punktwolke abgeleiteten Rasterpunkte dar, bei deren Interpolation eine geringe Glättung verwendet wurde. Die rote Linie zeigt das von diesen Punkten abgeleitete DOM. Die Kreuze stehen symbolisch für Punkte, die ALS-Methoden liefern. Die grüне gepunktete Linie stellt das aus den Laserpunkten abgeleitete DOM dar. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den Originalpunkten liegt in der Tatsache, dass ALS für dicht bewaldete Gebiete eine Punktwolke mit einer guten Durchmischung aus Boden- und Nicht-Bodenpunkten zur Verfügung stellt, während das Matching kaum Punkte auf den Bäumen liefert. Ein weiterer Unterschied zwischen den unterschiedlichen Basisdaten ist, dass im Gegensatz zu gänzlich ungefilterten ALS-Daten die

Rasterpunkte während des Matching-Prozesses vorgefiltert werden. Umrisse von Gebäuden und anderen Objekten erscheinen verschwommen, in engen Gassen und Innenhöfen werden keine Punkte auf dem Gelände ermittelt. Bereiche ohne Bodenpunkte sind daher bei Punktwolken, die mit Matching-Methoden ermittelt wurden, größer, als bei ALS-Punktwolken.

3.2 Anpassung der Filterstrategie

Die Methode, die im Laufe dieser Arbeit angewendet wurde, basiert auf einer Strategie, die bereits gute Resultate bei der Erstellung von DGMen aus ALS-Daten in locker verbauten Gebieten erreicht hat (Abbildung 3).

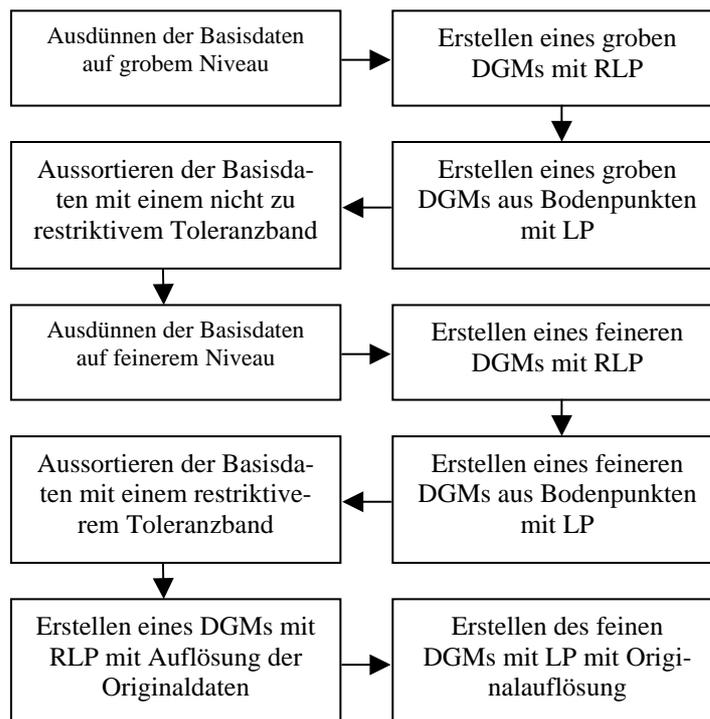


Abb. 3: Ablauf der hierarchischen Filterstrategie. LP: Lineare Prädiktion, RLP: Robuste Lineare Prädiktion.

Der Geländetyp, die Dichte der Vegetation und des verbauten Gebietes und die Größe der Gebäude sind die entscheidenden Faktoren beim Finden einer adäquaten Filterstrategie. Es stellte sich heraus, dass drei Iterationen der Schleife bestehend aus Ausdünnen, Filtern und Aussortieren der Punkte notwendig waren. In jeder Schleife wurden die Parameter derart bestimmt, dass die Eigenschaften der gematchten Punkte berücksichtigt wurden.

3.2.1 Erstellung eines groben DGMs durch starke Ausdünnung und Filterung der Daten

Im ersten Schritt wurde ein DGM aus Daten berechnet, die zu einem hohen Grad ausgedünnt wurden. Dabei wurde immer der niedrigste Punkt in einer gewissen Umgebung (quadratische Einheiten in SCOP++) ausgewählt. Der Grad, mit dem die Daten ausgedünnt werden, das heißt die Gitterweite, die für die ausgedünnten Daten gewählt wird, ist entscheidend dafür, ob die Methode brauchbare Ergebnisse liefert. Die Gitterweite darf nicht zu klein angesetzt werden. Bäume und Gebäude können dann auch in einem späteren Schritt nicht mehr eliminiert

werden. Wird sie zu groß gewählt, werden Details wie Geländeübergänge zu stark geglättet und bleiben nicht im Modell erhalten. Nachdem die Daten ausgedünnt worden waren, wurde eine robuste Interpolation mit den ausgedünnten Punkten gerechnet, um Nicht-Bodenpunkte zu beseitigen. Die Wahl der Filterparameter in dieser ersten Iteration ist entscheidend für den Erfolg des ganzen Prozesses. Werden in diesem Schritt Geländeübergänge, die nicht durch Geländekanten beschrieben sind, zu stark gefiltert, können diese auch in weiterer Folge nicht mehr ins Modell zurückgeführt werden. Schließlich erfolgte eine Modellberechnung mit den zuvor klassifizierten Bodenpunkten, um ein möglichst optimales Ergebnis nach der ersten Filterung zu erreichen. Dabei erhielten die Bodenpunkte wieder ihre Originalgewichte (KRAUS & PFEIFER, 1998). Die Gitterweite für das DGM wurde kleiner gewählt als die Gitterweite für das Ausdünnen der Daten. Nach dieser ersten Schleife konnte der Einfluss der Nicht-Bodenpunkte auf das DGM noch nicht ausreichend beseitigt werden. Andererseits war das Gelände noch sehr unscharf modelliert.

3.2.2 Verbesserung des groben DGMs durch feinere Filterung

Am Beginn der zweiten Iteration wird das berechnete DGM mit den Originaldaten verglichen. Originalpunkte, die innerhalb eines bestimmten Toleranzbandes liegen, werden als mögliche Bodenpunkte angesehen und für die weitere Berechnung verwendet. Punkte außerhalb dieses Bandes werden für den folgenden Arbeitsschritt nicht mehr akzeptiert. Die Ausmaße des Bandes müssen möglichst optimal sein. Auf der einen Seite dürfen nicht zu viele Bodenpunkte ausgeschlossen, auf der anderen Seite nicht zu viele Nicht-Bodenpunkte akzeptiert werden. Auf der einen Seite sollen negative Ausreißer aufgrund von Matching-Fehlern eliminiert werden. Auf der anderen Seite darf die obere Grenze nicht zu streng angesetzt werden, weil sonst zu viele Bodenpunkte ausgeschlossen werden. Nach Berechnung eines DGMs mit den nun verdichteten Daten, stellte sich heraus, dass der Einfluss von Nicht-Bodenpunkten auf Gebäuden und niedriger Vegetation nicht ausreichend eliminiert werden konnte. Die akzeptierten Bodenpunkte mussten daher wieder ausgedünnt werden. Es wurde diesmal eine kleinere Gitterweite für die Ausdünnung gewählt, als im 1. Schritt. Wiederum wurde immer der tiefste Punkt pro Masche ausgewählt. Danach wurde wieder ein Modell aus den ausgedünnten Daten mit robuster linearer Prädiktion berechnet. Diesmal wurde eine Gewichtsfunktion mit strengeren Parametern angewendet, um die Nicht-Bodenpunkte auf Gebäuden und niedriger Vegetation zu beseitigen. Die klassifizierten Bodenpunkte wurden nun für die zweite DGM-Berechnung mit linearer Prädiktion verwendet, wobei diesen wieder die Originalgewichte zugeteilt wurden. Dieses DGM war bereits eine relativ gute Schätzung des Geländes, auch wenn es noch einige Nicht-Bodenpunkte auf niedriger Vegetation beinhaltete.

3.2.3 Erstellung des feinen DGMs

Am Beginn der dritten Iteration wurde das zuvor erstellte DGM wieder mit den Originaldaten verglichen und verdichtet. Dazu wurde diesmal ein Toleranzband mit strengeren Grenzen angesetzt, da das DGM nach der zweiten Iteration eine viel bessere Schätzung war, als jenes nach der ersten. Danach wurde eine robuste lineare Prädiktion mit sehr restriktiven Werten durchgeführt, um die letzten Nicht-Bodenpunkte zu beseitigen. Das endgültige DGM wurde mit den zuletzt klassifizierten Bodenpunkten mit linearer Prädiktion berechnet, wobei wieder allen Punkten die Originalgewichte zugeteilt wurden. Die Gitterweite dieses DGMs sollte mit der Auflösung der Originaldaten übereinstimmen.

4 Ergebnisse

Um die Methode zu testen, wurden mehrere Datensätze mit unterschiedlichen Eigenschaften (Bebauungs- und Vegetationsdichte, Geländetyp, Bildmaßstab) verwendet.

4.1 Testdaten

Der erste Datensatz bestand aus Luftbildern, die über Eggenburg (Niederösterreich) aufgenommen wurden. Es handelt sich um eine Kleinstadt mit dichter Verbauung im Ortskern und lockerer Verbauung, Ackerland und wenig, aber dichtem Wald in der Umgebung. Das Gelände ist meist eben oder hügelig. Beim zweiten Testgebiet handelte es sich um die Stadt Salzburg. Sehr dichte Besiedlung zeichnete dieses Gebiet aus. Der dritte Satz der behandelten Luftbilder wurde über dem Hochgebirge der Schneealpe (Steiermark) aufgenommen. Scharfe Geländeübergänge und vorwiegend dichter Wald waren hier vorherrschend. Für alle Testgebiete wurde ein DOM mit MATCH-T berechnet, wobei für die Testgebiete Eggenburg und Schneealpe ein hoher, für Salzburg jedoch ein niedriger Grad der Glättung verwendet wurde. Die Flugparameter und die in MATCH-T gewählten Parameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Gebiet	M = 1:	f [mm]	r [μ m]	Geländetyp	Punktdichte	Glättung	Gitterweite [m]
Eggenburg	4500	152	30	Undulating	Medium	high	1.25
Salzburg	15000	305	14	Undulating	Dense	low	2.5
Schneealpe	15000	214	30	Mountainous	Dense	high	10.00

Tab. 1: Bildmaßstab M, Brennweite f und Scanrate r (Pixelgröße der Luftbilder) für alle Testgebiete. Geländetyp, Punktdichte, Glättung und Gitterweite sind die entsprechenden Parameter in MATCH-T.

4.2 Beispiele

Zu Beginn dieses Kapitels sollen Beispiele aus dem Bereich Eggenburg gezeigt werden, bei denen die Methode ein DGM von guter Qualität erstellen konnte. Abbildung 1 zeigt eine Schummerung eines DOM, das mit MATCH-T für einen Bereich im Osten von Eggenburg erstellt wurde. Abbildung 4 zeigt eine Schummerung des DGM desselben Gebietes nach Filterung mit SCOP++.

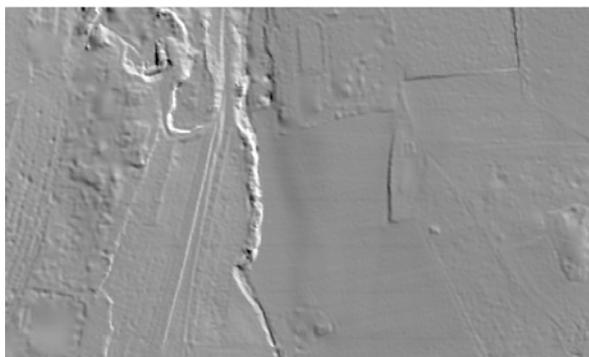


Abb. 4: Schummerung eines DGMs nach Einführung von Geländekanten und Filterung mit SCOP++. Bereich im Osten von Eggenburg (DOM vgl. Abb. 1).

Der Einfluss der Nicht-Bodenpunkte auf Gebäuden konnte vollständig eliminiert werden. Auch große Gebäude wie eine Fabrikhalle im unteren linken und Wohnblöcke im oberen rechten Bereich werden im DGM nicht mehr dargestellt. Dieses Ergebnis konnte in erster

Linie durch die Wahl einer relativ großen Gitterweite für das erste Ausdünnen der Daten mit 15 Metern erreicht werden. Gleichzeitig wurden dadurch aber einige Geländeformen und -übergänge zu stark gefiltert (geglättet). Um diesen Effekt zu verhindern, wurden im Vorhinein Geländekanten gemessen und in den Filterprozess miteinbezogen. Dadurch konnten die zu starken Filtereffekte an Geländeübergängen verhindert werden. Ein Effekt, den der hohe Grad der Glättung beim Matching verursachte, war, dass Gebäude zwar geglättet, aber nicht eliminiert wurden. Dadurch wurden bei der robusten Filterung einige Nicht-Bodenpunkte fälschlicherweise als Bodenpunkte klassifiziert, da sich einige Gebäude nicht deutlich genug vom Gelände abhoben. Ob das Bestimmen der Parameter in SCOP++ dadurch erleichtert werden kann, indem der Parameter *Glättung* beim Matching auf *low* gesetzt wird, wurde bei der Bearbeitung des Testgebietes Salzburg überprüft. Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse vor und nach der Filterung für ein weiteres Gebiet im Raum Eggenburg. Auch hier konnte der Einfluss der Nicht-Bodenpunkte auf Gebäuden vollständig eliminiert werden.

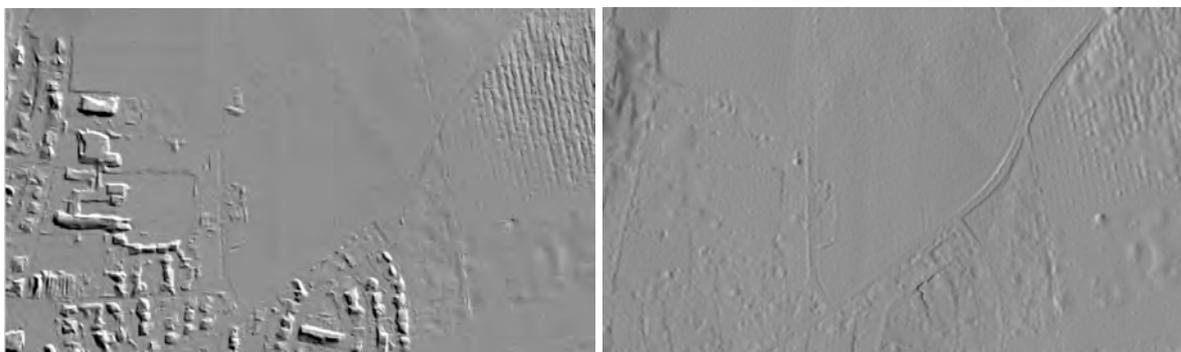


Abb. 5: Schummerung eines DOM erstellt von MATCH-T (links) und des DGM nach der hierarchischen Filterung (rechts). Bereich im Nordwesten von Eggenburg.

Nachdem die Methode in locker verbautem Gebiet durchweg sehr gute Ergebnisse geliefert hatte, wurde nach Anregung durch das Vermessungsbüro Wenger-Oehn mit dem Stadtgebiet Salzburg ein dicht verbautes Gebiet getestet. Die Basisdaten wurden aus dem Bildflug Salzburg (WÜRLÄNDER et. al., 2004) ebenfalls mit dem Programm MATCH-T im Vermessungsbüro Wenger-Oehn abgeleitet, der Parameter *Glättung* diesmal jedoch auf *low* gesetzt. Dies bewirkte, dass sich Gebäude tatsächlich schärfer vom Gelände abhoben. Punkte auf Gebäuden konnten leichter als Nicht-Bodenpunkte klassifiziert werden. Auf der anderen Seite mussten viele ‚negative‘ Fehler, die durch das Matching verursacht und durch die geringe Glättung nicht eliminiert wurden, beseitigt werden. Da MATCH-T in dicht verbauten Gebieten nur wenige Bodenpunkte liefert, musste hier der Parameter für die erste Ausdünnung der Daten sehr groß (30 Meter) gewählt werden. In sehr dicht verbautes Gebiet waren die fehlenden Bodenpunkte in engen Gassen und Innenhöfen der Hauptgrund, warum hier keine so guten Ergebnisse wie für locker verbautes Gebiet erzielt wurden. Dennoch konnte der Einfluss der Nicht-Bodenpunkte auf Gebäuden größtenteils beseitigt und ein DGM von sehr guter Qualität erreicht werden (Abb.6).

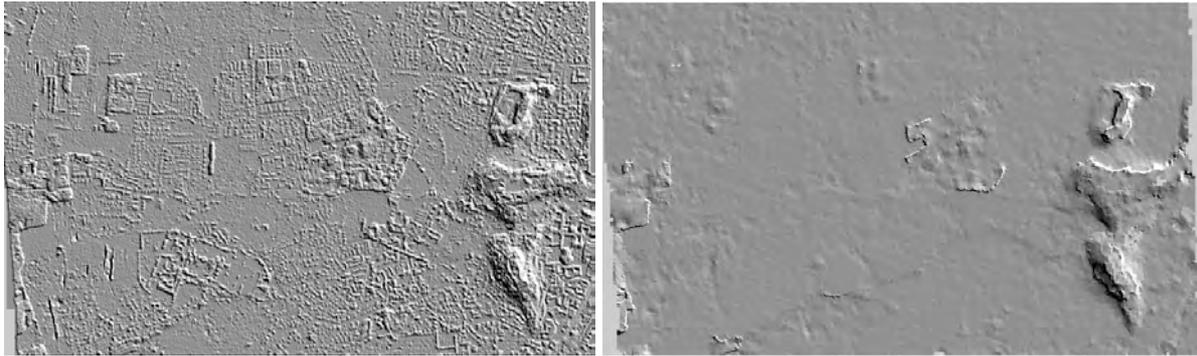


Abb. 6: Schummerung eines DOM erstellt von MATCH-T (links) und des DGM nach der hierarchischen Filterung (rechts). Bereich Stadt Salzburg.

Im Anschluss soll ein Beispiel präsentiert werden, bei dem es nicht möglich war, den Einfluss der Nicht-Bodenpunkte mit der beschriebenen Methode zu eliminieren. Das Testgebiet der Schneetalpe wurde ausgewählt, um die Methode auch in bewaldetem Gebiet zu testen. Aufgrund des kleinen Bildmaßstabs wurde die Gitterweite für den MATCH-T-Raster mit 10 Metern festgesetzt. Nach mehreren Versuchen mit unterschiedlichen Parametersätzen stellte sich heraus, dass die Methode den Einfluss der Nicht-Bodenpunkte auf den Bäumen nicht beseitigen kann, weil die digitale Bildzuordnung in bewaldeten Gebieten zu wenig Bodenpunkte liefert (siehe Abbildung 8). Der Nachteil von digitalen Matching-Methoden gegenüber dem ALS ist hier offensichtlich.

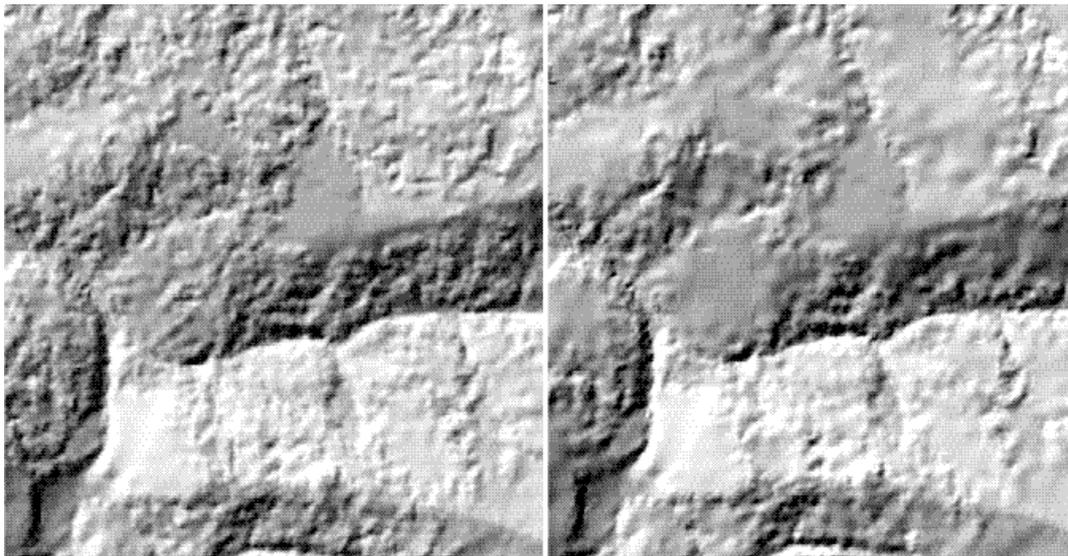


Abb. 8: Schummerung eines DOM vor (links) und nach der hierarchischen Filterung (rechts) mit SCOP++ (Schneetalpe).

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Filtermethoden, die sich bei der DGM-Erstellung aus ALS-Daten bewährt haben, können mit gewissen Einschränkungen auch für Daten verwendet werden, die mit Methoden des Image Matching gewonnen wurden. Der wesentliche Unterschied zwischen ALS-Daten und Matching-Ergebnissen ist aber die unterschiedliche Verteilung der Punkte in bewaldeten und dicht verbauten Gebieten. Die Abfolge der Arbeitsschritte in SCOP++ kann zwar für beide Datensätze dieselbe sein, die Parameter müssen aber an die Eigenschaften eines mit Matching ermittelten DOMs angepasst werden. Ein Punktraster, der mit Matching-Methoden erstellt

wurde, enthält trotz integrierter Filtermethoden noch immer Nicht-Bodenpunkte. Diese ‚Fehler‘, bezogen auf das DGM, sollen mit der in dieser Arbeit beschriebenen Methode beseitigt werden. Tests zeigen, dass für verbautes Gebiet gute und zum Teil ausgezeichnete Ergebnisse erreicht werden können. Der Einfluss der Nicht-Bodenpunkte wird zum größten Teil beseitigt. Die damit verbundene Glättung von Geländeformen und -übergängen kann durch die Messung und Einbeziehung von Geländekanten in den Filterprozess verhindert werden. Für bewaldete Gebiete lassen sich keine zufriedenstellenden Ergebnisse erreichen, da kaum Bodenpunkte durch Matching ermittelt werden. ALS-Daten sind viel besser geeignet, um ein DGM in bewaldeten Gebieten zu erstellen (KRAUS & PFEIFER, 1998). Wird der Parameter für die Glättung so gering wie möglich angesetzt, wird die Bestimmung der Parameter zur Eliminierung von Nicht-Bodenpunkten vereinfacht. Andererseits müssen Matching-Fehler stärker berücksichtigt werden. Eine Verbesserung der Ergebnisse könnte auch durch die Verwendung der ungefilterten Matching-Daten erreicht werden. Dies soll in Zukunft getestet werden.

Danksagung

Diese Publikation entstand in Zusammenarbeit mit den Vermessungsbüros Wenger-Oehn, Salzburg, und AVT ZT Ges.m.b.H., Imst, im Rahmen des Christian Doppler-Labors ‚Spatial Data from Laser Scanning and Remote Sensing‘.

Literaturverzeichnis

- BAUERHANSL, C., 2003: Verbesserte Ableitung von Geländemodellen aus der digitalen Bildzuordnung, Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, 2003.
- BAUERHANSL ET AL., 2004: Determination of terrain models by digital image matching methods, *ISPRS XX / Commission IV, WG IV/6*. To be published in July 2004.
- BRIESE, CH., PFEIFER, N. & DORNINGER, P., 2002: Application of the robust interpolation for DTM determination. In: *IAPRSIS XXXIV / 3A*, pp. 55 - 61.
- GÜLCH, E., 1994: Erzeugung digitaler Geländemodelle durch automatische Bildzuordnung. PhD thesis, Institute of Photogrammetry, University of Stuttgart. DGK-C 418.
- KRAUS, K., PFEIFER, N., 1998: Determination of terrain models in wooded areas with aerial laser scanner data. *ISPRS J. of Ph. & RS*. 53, pp. 193-203.
- KRAUS, K., 2000: Photogrammetrie Band 3. Topographische Informationssysteme. 1st ed., Dümmler Verlag, Bonn.
- KRZYSZEK, P. & ACKERMANN, F., 1995: New investigations into the practical performance of automatic DEM Generation. Proc. of the ACSM/ASPRS Convention, Charlotte, 1995.
- [SCOP, 1999a]: Das Programmsystem SCOP, 1999. Benutzerhandbuch des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien.
- SUMMIT EVOLUTION, 2001: Summit Evolution, Digital Stereoplotter for use with Windows NT or Windows 2000. Operation Manual, DAT/EM Systems International.
- WÜRLÄNDER, R., FARTHOFER, M. & WENGER-OEHN, K., 2004: Vom Bildflug zum virtuellen Flug über das Bundesland Salzburg. In: *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XVI*, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- INPHO GmbH, 2003: Web page: www.inpho.de, 15.3.2003;

Evaluation automatisch rekonstruierter Gebäudemodelle aus Flugzeuglaserscannerdaten

ALEXANDRA D. HOFMANN¹, ELLEN SCHWALBE²

Zusammenfassung: Der folgende Beitrag befasst sich mit der Evaluierung der Ergebnisse zweier Methoden zur Rekonstruktion von virtuellen Gebäudemodellen aus Flugzeuglaserscannerdaten. Beide Methoden werden kurz vor- und gegenübergestellt. Die Ergebnisse, die rekonstruierten virtuellen Gebäudemodelle, werden bezüglich ihrer Korrektheit und Genauigkeit untersucht. Als Maß für die Genauigkeitsbewertung dienen sowohl photogrammetrisch abgeleitete als auch terrestrisch bestimmte Dachinformationen. Es wird gezeigt, dass aus Flugzeuglaserscannerdaten automatisch abgeleitete Dachinformation durchaus als Grundlage für virtuelle Landschaftsmodelle verwendet und photogrammetrisch bestimmte Informationen durch diese ersetzt werden können.

1 Einleitung

Die Erstellung von 3D-Stadt- und Landschaftsmodellen ist momentan ein sehr aktuelles Thema. Die wichtigsten Bestandteile sind hier 3D-Gebäudemodelle neben digitalen Geländemodellen und 3D-Daten von Straßen und Vegetation. In der Literatur wurden einige Ansätze zur automatischen Rekonstruktion von Gebäudemodellen aus Flugzeuglaserscannerdaten vorgestellt. Unter ihnen sind (HAALA & ANDERS, 1997), (MAAS, 1999) und (ROTTENSTEINER & BRIESE, 2002) um nur einige zu nennen. Alle betrachten den Erfolg und Automatisierungsgrad ihrer Methode, doch nur einzelne (MAAS, 1999) beurteilen auch die erreichte Genauigkeit der Gebäudemodelle. Diese ist jedoch für die letztendliche Nutzung in einem 3D Stadt- oder Landschaftsmodell von großem Interesse.

In diesem Beitrag werden zwei weitere Methoden erörtert, die automatisch 3D-Gebäudemodelle aus Punktwolken von Flugzeuglaserscannerdaten generieren. Die erste Methode, Parameterraum-Methode genannt (Abschnitt 2.1), basiert auf der Analyse der Lageeigenschaften von 2,5D Maschen einer in die Punktwolke gerechneten TIN-Struktur. Die andere Methode, kurz Linienmethode (Abschnitt 2.2), ermittelt die Ausrichtung eines Gebäudes und nutzt spezifische Orthogonalprojektionen der Punktwolke zur Bestimmung der Dachflächen. Die beiden Verfahrensansätze sind grundverschieden und arbeiten unabhängig voneinander.

Mit den erhobenen Untersuchungen soll gezeigt werden, inwieweit mit den vorgestellten Methoden Gebäudemodelle aus Flugzeuglaserscannerdaten erstellt werden können und ob diese in Vollständigkeit und Genauigkeit mit photogrammetrisch bestimmten Modellen konkurrieren können. Sollte dies der Fall sein, können sie auch eine Grundlage für ein 3D-Stadt- oder Landschaftsmodell darstellen oder sogar zur automatischen Kartenaktualisierung dienen.

¹ Dipl.-Ing. Alexandra D. Hofmann, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden, Mommsenstr. 13, 01062 Dresden, e-mail: Alexandra.Hofmann@mailbox.tu-dresden.de

² Dipl.-Ing. Ellen Schwalbe, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden, Mommsenstr. 13, 01062 Dresden, e-mail: Ellen.Schwalbe@mailbox.tu-dresden.de
<http://www.tu-dresden.de/fghgipf/index.htm>

2 Methoden zur Gebäudemodellrekonstruktion

2.1 Parameterraum-Methode

Die Parameterraum-Methode nutzt die Lageinformationen von 2,5D Maschen einer Dreiecksvermaschung (Delaunay Triangulation), welche in jede Punktwolke gerechnet wird. Abb. 1a zeigt ein Beispiel. Zu jeder Masche/Dreieck werden Parameter (Neigungsgrad φ , Orientierung ω und Abstand d zum Ursprung) bestimmt, die dessen Ausrichtung und Position im Raum eindeutig definieren. Da alle auf einer Dachseite liegenden Dreiecke ähnliche Lageparameter besitzen, gruppieren sich diese im Parameterraum (siehe Abb. 1b oben).

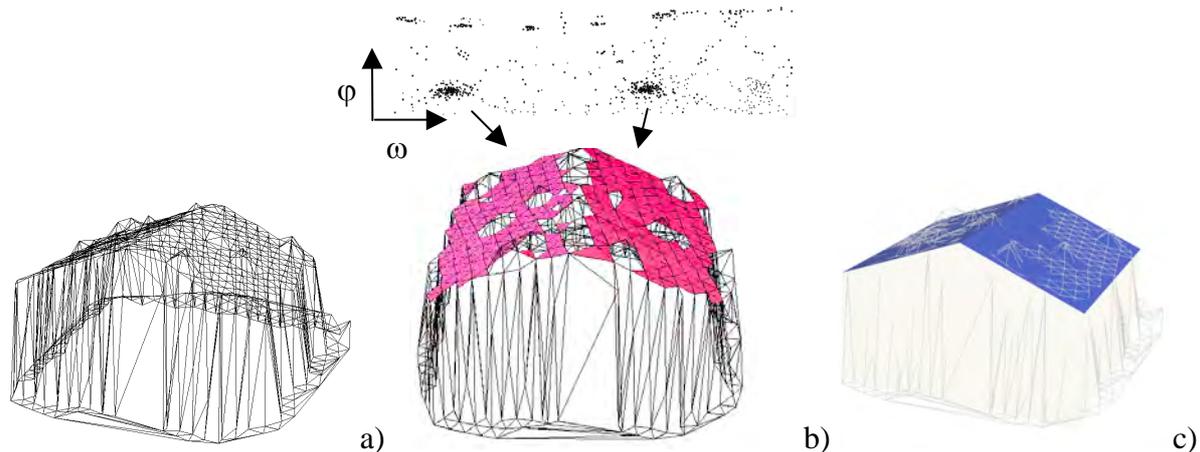


Abb. 1: a) Punktwolke mit Dreiecksvermaschung b) Zuweisung der Parameterpunkte zu den einzelnen Dachflächen c) rekonstruiertes Gebäudemodell

Eine Clusteranalysetechnik detektiert diese Anhäufungen unter Nutzung von Wissen über die Geometrie von Dächern, wie z.B. den maximalen Neigungsgrad. Weitere Kenntnisse über die Dachform sind nicht nötig. Die gesammelten Punkte im Parameterraum werden über eine Region-Growing Technik den einzelnen Flächenelementen zugewiesen. Über Nachbarschaftsbedingungen werden die einzelnen Flächenelemente einander zugewiesen und logisch verschnitten. Das Ergebnis ist ein vereinfachtes 3D Modell des Daches. Eine ausführliche Beschreibung der Methode kann in (HOFMANN, MAAS & STREILEIN, 2003) und (HOFMANN, 2004) nachgelesen werden.

2.2 Linienmethode

Die Idee, die der Linienmethode zugrunde liegt, ergibt sich aus der Überlegung, dass die meisten Informationen zur Dachrekonstruktion durch die Betrachtung der Giebelseite des Gebäudes erhalten werden. Es ist zu erkennen, dass sich Dachflächen, wenn sie in eine Vertikalebene parallel zu Giebelseite des Gebäudes projiziert werden, als Linien abbilden (vgl. Abb. 2). Aus dieser Blickrichtung lassen sich die Dachart des Gebäudes sowie die Anzahl, die Neigung α und die Breite b der Dachebenen E_1 und E_2 abschätzen.

Die Methode setzt sich aus mehreren Arbeitsschritten zusammen: Zur Verringerung der Datenmenge werden zunächst mittels einer Histogrammanalyse potenzielle Bodenpunkte aus dem Datensatz eliminiert. Als zweiter Schritt erfolgt die Bestimmung der Hauptausrichtung des Gebäudes. Dabei wird in den Punkten einzelner Höhenschichten der Punktwolke nach Linien gesucht. Die Ausrichtungen der gefundenen Linien entsprechen den Ausrichtungen des Gebäudes.

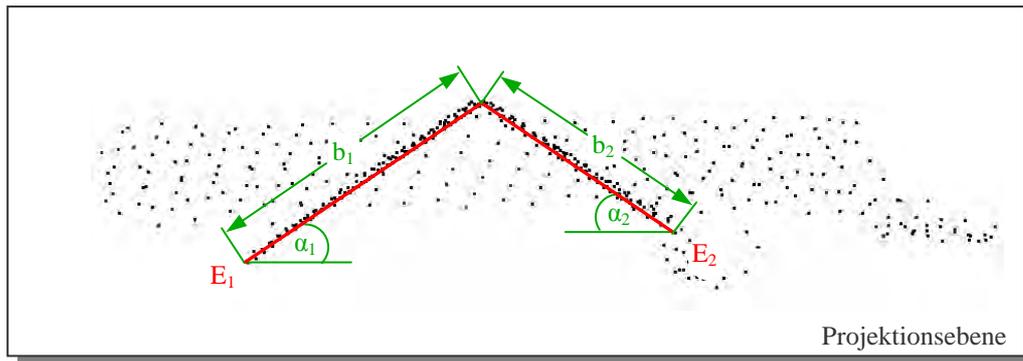


Abb. 2: In eine Giebelseite projizierte Punktwolke

Anschließend werden die Datenpunkte um die z-Achse rotiert, so dass die Hauptrichtung des Gebäudes zur y-Achse des zugrundeliegenden Koordinatensystems parallel ist. Nach der Rotation erfolgt die Projektion der Datenpunkte in die z-x- und z-y-Ebene. In den projizierten Datenpunkten werden Einzelpunkte eliminiert und die Daten ausgedünnt, um die anschließende Liniensuche zu begünstigen. Im Anschluss an die Liniensuche in den projizierten Punkten erfolgt die Ermittlung der Neigung sowie der Breiten- und Längsausdehnung der Dachebenen, welche durch die detektierten Linien repräsentiert werden. Mit diesen Informationen können die Dachebenen als rechteckige Polygone dreidimensional rekonstruiert werden. Der vollständige Algorithmus ist in SCHWALBE (2004) beschrieben.

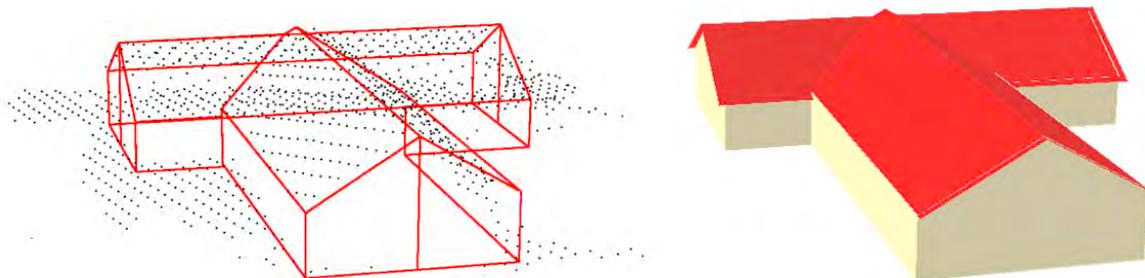


Abb. 3: Drahtrahmen und Flächenmodell der projizierten Punktwolke von Abb. 2

2.3 Vergleich beider Methoden

Beide Methoden sind in ihrer Strategie und Arbeitsweise grundverschieden. So ermöglicht die Parameterraum-Methode die Rekonstruktion von komplexeren Gebäuden, bedingt allerdings auch eine gute Datengenauigkeit bzw. Streifeninformation und reagiert empfindlich auf geometrische Diskrepanzen bzw. sich ungünstig überlagernde Flugstreifen. Bei dieser Methode wird im Gegensatz zur Linienmethode ein einzelner Flugstreifen gewählt, mit dem die Dachinformation rekonstruiert wird. Prinzipiell wird bei höherer Punktdichte und bei genügend genauen Laserscannerdaten auch eine höhere Informationsgewinnung erwartet. Die Linienmethode bearbeitet erfahrungsgemäß auch Flugzeuglaserscannerdaten schlechterer Qualität, ist aber auf Gebäude mit maximal zwei Firstrichtungen limitiert. Beide Methoden haben allerdings eine Untergrenze für modellierbare Flächen, welche bei ca. 10 Punkten pro Fläche liegt.

Die vorgestellten Methoden arbeiten voll automatisch. Das heißt, dass jede einzelne Punktwolke vom Programm bearbeitet wird und die Ergebnisse als VRML-Dateien abgelegt werden. Die Kontrolle der Ergebnisse obliegt bislang noch dem Nutzer. Kapitel 4.1 informiert über die Erfolgsrate der Methoden.

Für die Parameterraum-Methode benötigt ein Athlon-Duron-Prozessor (700 MHz) mit 512MB RAM ca. 6 min für 100 Satteldächer des Schweizer Datensatzes. Die Linienmethode durchläuft diese Gebäude in ca. der Hälfte der Zeit. Der Zeitaufwand für die Parameterraum-Methode steigt mit zunehmender Punktdichte und dem Grad der Komplexität der Gebäude exponential an, wohingegen der Zeitaufwand, den die Linienmethode benötigt, vorwiegend mit der Komplexität der Gebäude korreliert ist.

3 Ergebnisse und Genauigkeiten

In diesem Kapitel werden die entstandenen Modelle, bezüglich der Topologie, in „korrekt modellierte“, „größtenteils korrekt modellierte“ und „nicht verwendbare“ Modelle unterteilt und statistisch aufgeschlüsselt. Die geometrische Bewertung findet im direkten Vergleich der automatisch abgeleiteten Gebäudemodelle mit herkömmlich photogrammetrisch oder terrestrischen bestimmten Modellen statt.

3.1 Ergebnisse der Gebäudemodellrekonstruktionen

Um den Erfolg der Methoden zu quantifizieren, wurden 200 Gebäude eines Datensatzes mit beiden Ansätzen prozessiert und die Ergebnisse ausgewertet. Dieser Datensatz hat Multiple Flugzeuglaserscannerdaten mit 2m Punktabstand innerhalb eines Flugstreifens. Die Flugstreifen wurden mit mindestens 40% Überlappung geflogen, womit insgesamt ein mittlerer Punktabstand von ca. 1,2m erreicht wird. Das beflogene Gebiet ist eine ländliche, alpine Region der Schweiz mit vorwiegend Einzelhausbebauung.

Als korrekt wurden diejenigen Modelle bezeichnet bzw. dargestellt, bei denen alle Dachflächen vollständig rekonstruiert wurden und die keiner Nachbearbeitung bedürfen. Größtenteils korrekt gekennzeichnete Modelle enthalten mindestens die Hälfte aller vorhandenen Dachflächen und müssen, aus der Sicht eines Operators, mit wenigen Schritten zum vollständigen Modell zusammengeführt werden können. Alle übrigen Modelle, einschließlich nicht rekonstruierter Punktwolken wurden als unbrauchbar eingestuft. Tabelle 1 fasst die erhaltenen Ergebnisse zusammen.

	Linienmethode	Parameterraum-Methode
Korrekt	60%	61%
Größtenteils korrekt	11%	28%
Nicht verwendbar	29%	11%

Tabelle 1: Erfolgsrate der rekonstruierten Gebäudemodelle

Die Erfolgsrate für korrekt rekonstruierte Gebäude (Beispiele siehe Abb. 4) der beiden Methoden kann als gut eingeschätzt werden. Prinzipiell hat die Parameterraum-Methode leicht bessere Ergebnisse, da mehr Gebäude als größtenteils korrekt bestimmt wurden. Jedoch ist der Erfolg beider Methoden von der Qualität der Laserscannerdaten, der Größe der Punkt-

wolke und der Art des Gebäudes abhängig. Hinsichtlich der Qualität der Laserscannerdaten ist hier die Information zu den einzelnen Flugstreifen von Interesse. Die Größe der Punktwolke hat insofern Einfluss auf den Erfolg der automatischen Rekonstruktion, als das nicht in die Punktwolke gehörige Objekte, wie Vegetation, oder auch starke Hanglagen die Auswertung behindern. Da beide Methoden die Punktwolke nach ebenen Flächen durchsuchen, können zu kleine Objekte auf Dächern, wie z.B. Dachgauben, störend wirken. Das hat zum Ergebnis, dass diese Dachfläche nicht oder nur teilweise rekonstruiert wird.

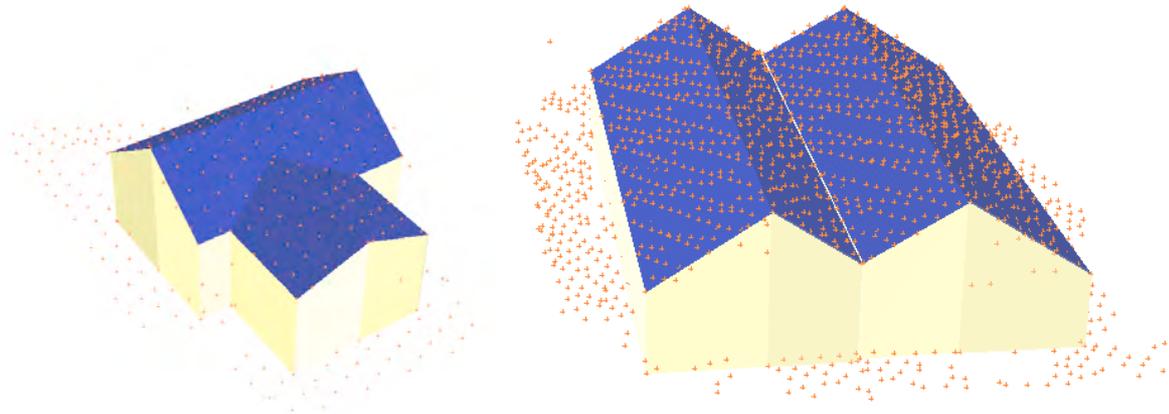


Abb. 4: Beispiele für korrekt rekonstruierte Gebäudemodelle

Unter optimalen Bedingungen können Erfolgsraten von bis zu 70% erreicht werden. Wohingegen in sub-optimalen Datensätzen, das heißt schlecht angepasste Streifen und keine vorhandene Streifeninformation, mit komplexen Dachstrukturen nur ca. 45% der Gebäude erfolgreich rekonstruiert werden.

3.2 Genauigkeitsbetrachtung der entstandenen Gebäudemodelle

Neben der eben betrachteten Korrektheit der Gebäudemodelle ist deren Genauigkeit im Sinne der Lage und Größe auch von großem Interesse. Die beiden folgenden Abschnitte prüfen einerseits die absolute Lagegenauigkeit der Modelle und vergleichen andererseits die Modelle mit herkömmlich photogrammetrisch gemessenen Daten.

3.2.1 Vergleich terrestrisch bestimmter Gebäudemaße zu denen der Flugzeuglaserscannerdaten

Um eine genaue Quantifizierung der mit den rekonstruierten Gebäudemodellen erreichten Genauigkeit zu erlangen, wurden fünf willkürlich gewählte Gebäude eines lokalen Datensatzes (Dresden) terrestrisch mit einem Tachymeter mittels reflektorloser Distanzmessung aufgenommen. Diese fünf Gebäude beinhalten Sattel- und Walmdächer und ein Zeltdach. Von den Gebäuden wurde jeweils die Höhe und Position der Enden des Firstes und alle Dachkanten bestimmt. Diese Werte wurden mit den Koordinaten der entsprechenden Modellpunkte verglichen, wobei bei den Dachkanten nur die Position gewertet wurde, da die Höhenangabe mit dem Dachanstieg korreliert ist. Der Laserscannerdatensatz ist in Form eines regelmäßigen Rasters (1m) vorhanden.

Es zeigt sich, dass die Gebäudemodelle neben einer erstaunlich guten Höhengenaugkeit auch über eine äußerst gute Dachneigung und Ausrichtung verfügen. Der mittlere Lagefehler der

Dachkanten ist im Vergleich zur Punktdichte recht hoch. Er wurde im Bereich des halben Punktabstandes, also 0,5m, erwartet. In diesem Bereich liegen auch die Genauigkeitsangaben in MAAS (1999).

	Linienmethode	Parameterraum-Methode
Dachfirst: Position und Höhe	0,7m / 0,1m	0,7m / 0,1m
Dachkanten (mittlerer RMSE in Position)	0,8m	1,2m
Dachneigung	0,7°	0,3°
Ausrichtung	0,1°	0,4°

Tabelle 2: Gemittelten Genauigkeitsmaße der rekonstruierten Gebäudemodelle

Im Wesentlichen wird der Dresdner Datensatz (1m Raster) als Laserscannerdatensatz höherer Qualität betrachtet, da keine Streifendiskrepanzen vorhanden sind. Zudem ist eine optimale Segmentierung über die terrestrischen Aufnahmen gewährleistet. Somit können die Ergebnisse aus Tabelle 2 in Bezug auf die Punktdichte als absolute Genauigkeiten gewertet werden. Mit einer sich ändernden Punktdichte sollte sich auch die Genauigkeit der Lagekoordinaten der Dachendpunkte entsprechend ändern.

3.2.2 Vergleich photogrammetrisch abgeleiteter Gebäudemaße mit denen der Flugzeuglaserscannerdaten

Neben dem Vergleich der rekonstruierten Gebäudemodelle zu terrestrischen Messungen ist der Vergleich zu photogrammetrisch gemessenen Dachpunkten von praktischem Interesse. Für ca. 40 Gebäude des Schweizer Datensatzes lagen photogrammetrisch gemessenen Dachpunkte mit einer Lagegenauigkeit von etwa 20 cm und einer Höhengenaugigkeit von 50 cm vor. Tabelle 3 gibt die mittleren Differenzen der Eckkoordinaten zwischen den rekonstruierten und den photogrammetrisch bestimmten Modellen wieder. Neben diesen Maßen wurden relative Maße wie Länge, Breite und Dachhöhe berechnet. Diese sind aufgrund der lokalen Korrelation gegenüber systematischen Fehlern weniger anfällig. Sie zeigen, dass die photogrammetrischen Auswertungen recht gut zu den rekonstruierten Modellen passen.

Das Genauigkeitspotenzial von Lage und Höhe bei der photogrammetrischen Messung von Gebäuden durch einen Operateur ist dem der Laserscannerdaten gerade entgegengesetzt: Bei photogrammetrischen Messungen ist – schon aufgrund des Basis-Höhen-Verhältnisses bei der Aufnahme – die Lagegenauigkeit besser als die Höhengenaugigkeit. Dies zeigt sich bei der Analyse der Gebäudemodelle deutlich in Form von photogrammetrisch gemessenen Gebäudemodellen, die in Höhe und Dachneigung klar von der Laserscannerpunkt wolke (ohne jegliche automatische Rekonstruktion) abweichen (siehe Abb. 5). Vergleicht man in die photogrammetrische Auswertung mit den originalen Laserscannerpunkten, so sieht man in vielen Fällen systematische Abweichungen:

- Die photogrammetrische Auswertung liegt häufig systematisch über oder unter der Punkt wolke. Diese Abweichung beträgt bis zu einem Meter.
- Dachfirste weisen systematische horizontale Verschiebungen und Verdrehungen auf.

- Die Dachneigung der photogrammetrischen Auswertung entspricht nicht der aus den Laserscannerrohdaten ablesbaren Neigung.
- Die Größe der automatisch modellierten Gebäude ist in der Regel etwas kleiner als die der photogrammetrischen Auswertung

	Linienmethode	Parameterraum-Methode
gemittelte RMSE-Unterschied aller Eckkoordinaten	1,2m \pm 0,3m	1,1m \pm 0,4m
Gemittelte Firsthöhendifferenzen	-0,5m \pm 0,3m	-0,4m \pm 0,3m
mittlere Differenzen der Umrisse	Länge 0,3m \pm 0,8m Breite 0,6m \pm 0,6m	Länge 0,5m \pm 0,6m Breite 0,1m \pm 0,7m

Tabelle 3: Abweichungsmaße der automatisch abgeleiteten Eckkoordinaten und Gebäudemaße zu den photogrammetrischen Dachpunkten

Diese Effekte sind unabhängig von der automatischen Rekonstruktion vorhanden. Während die Verschiebung der Dächer in Lage und Höhe möglicherweise auf systematische Fehler der Laserscannerbefliegung zurückzuführen sind (GPS/INS-Suboptimalitäten und unzureichender Streifenausgleich), zeigen die Diskrepanzen in der Dachneigung, welche ohne jegliche Rekonstruktion aus der rohen Punktwolke erkennbar sind, eindeutig, dass die Laserscannerdaten in der Höhe eine Genauigkeit aufweisen, die der photogrammetrischen Auswertung überlegen ist.

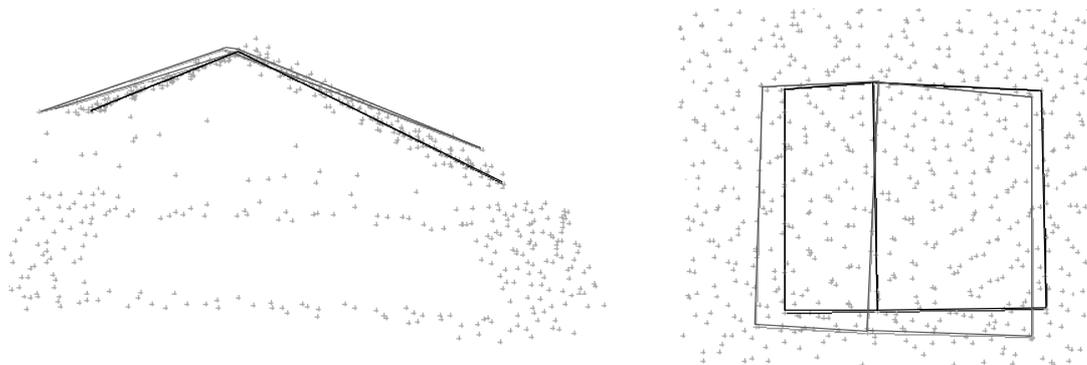


Abb. 5: Vergleich der Dachinformation der photogrammetrischen Auswertung (grau) und der rekonstruierten Modelle (schwarz) mit unterlegter Punktwolke.

4 Zusammenfassung

Es wurden zwei Methoden entwickelt, die automatisch 3D-Gebäudemodelle in Punktwolken rechnen. Mit beiden Methoden ist es möglich, eine große Anzahl an Gebäude in kurzer Zeit recht erfolgreich zu berechnen. Die bislang erhaltenen Ergebnisse sind als positiv zu beurteilen, da in Gebieten mit wenig komplexer Gebäudestruktur eine Erfolgsquote von 70% er-

reicht wurde. Komplexe Gebäudestrukturen können prozessiert werden, allerdings liegt hier die Erfolgsquote niedriger.

Die geometrische Genauigkeit der Modelle entspricht mindestens der der photogrammetrisch bestimmten Modelle. Der visuelle Vergleich zeigt, dass korrekt modellierte Gebäude sich in Höhe und Ausrichtung sehr gut in die Punktwolke einpassen. In der photogrammetrischen Auswertung sind dagegen auffällige Dachhöhen- und –Neigungsunterschiede zu sehen. Ein Vergleich zu klassisch terrestrisch gemessenen Gebäudekanten weist eine absolute Lagegenauigkeit im Bereich des Laserscannerpunktabstandes und eine Höhengenaugkeit von ca. 10 cm aus.

5 Danksagung

Diese Studie wurde vom Schweizer Bundesamt für Landestopographie unterstützt. Die Autorinnen danken dem Schweizer Bundesamt für Landestopographie und der Landestalsperrenverwaltung Sachsen für die Bereitstellung der Flugzeuglaserscannerdaten.

6 Literaturverzeichnis

- HAALA, N., ANDERS, K. 1997: Aquisition of 3D urban models by analysis of aerial images, digital surface models and existing 2D building information – SPIE Conference on Integrating Photogrammetric Techniques with Scene analysis and Machine Vision III, Orlando, Florida, pp.212-222
- HOFMANN, A.D., MAAS, H.-G., STREILEIN, A. 2003: Derivation of roof types by cluster analysis in parameter spaces of airborne laserscanner point clouds – IAPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol.34, Part 3/W13, pp.112-117
- HOFMANN, A.D 2004: Analysis of Tin-Structure parameter spaces in airborne laser scanner data for 3-D building model generation – ISPRS XXth Congress, Istanbul, Turkey (eingereicht)
- MAAS, H.-G., VOSSELMAN, G. 1999: Two algorithms for extraction building models from raw laser altimetry data – ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 54 **1999** pp. 153-163
- ROTTENSTEINER, F., BRIESE, C. 2002: A new method for building extraction in urban areas from high-resolution LIDAR data – IAPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol.34, Part 3A, pp.295-301
- SCHWALBE, E., HOFMANN, A.D., MAAS, H.-G., 2004: Gebäudemodellierung in reduzierten Parameterräumen von Flugzeug-Laserscannerdaten. - Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG), **2004** (Heft 4)

Multiple Bildkorrelation im dreidimensionalen Objektraum mit konvergenten Aufnahmen

AXEL WENDT, THOMAS LUHMANN, RALPH RIEDE & MANFRED WEISENSEE¹

Zusammenfassung: Der vorliegende Beitrag beschreibt ein Verfahren zur 3D Oberflächenrekonstruktion durch multiple Bildkorrelation. Die Bildkorrelation entspricht einer Ausgleichung, die als funktionales Modell den physikalischen Prozess der Bildentstehung modelliert und damit jeden Bildstrahl in direktem Bezug zum Objekt stellt. Dadurch lassen sich zusätzliche Beobachtungen wie 3D Punkte, die über eine zu definierende Funktion ebenfalls in direktem Bezug zum Objekt stehen, gemeinsam ausgleichen. Im Beitrag wird erläutert, wie texturarme Oberflächenbereiche durch regularisierende Funktionen überbrückt werden können und wie rekonstruiert Oberflächenbereiche in ihrer Zuverlässigkeit beurteilt werden können. Es wird zudem eine Surf-Strategie vorgestellt, die es erlaubt patchweise komplexe dreidimensionale Objekte photogrammetrisch zu rekonstruieren.

1 Motivation

Die flächenhafte Rekonstruktion dreidimensionaler Objekte stellt eine besondere Herausforderung dar, da neben der zu beherrschenden Messmethodik, Fragen aufgrund der Parametrisierung des Objektes, Störeinflüsse aufgrund von Oberflächenreflexion, Beleuchtung u.a., sowie der Verknüpfung einzelner Standpunkte zu beantworten sind. Neben der Möglichkeit die Oberfläche durch Streifenprojektion oder terrestrische Laserscanner abzuscannen, lässt sich die Oberfläche photogrammetrisch erfassen und durch Bildkorrelation diskret rekonstruieren. Aufgrund möglicher kurzer Belichtungszeiten und synchronisierter Mehrbilderfassung ergibt sich der Vorteil, das Objekt auch mit einem mobilen handgeführten System zu erfassen.

Für die Bildkorrelation wird der Ansatz des Facetten-Stereo-Sehens (WROBEL 1987) modifiziert, bei dem multiple Bilder verarbeitet werden können. Die Oberfläche wird patchweise rekonstruiert, indem am Objekt die Tangentialebene als Parameterfläche für ein Patch definiert wird und auf dieser ein Raster gebildet wird, dessen Höhenstützstellen durch die Bildkorrelation bestimmt werden. In dem gewählten Korrelationsansatz lassen sich ebenfalls Vorinformationen über das Objekt, zusätzliche Beobachtungen wie 3D Punkte oder weitere Bedingungen der Objektoberfläche integrieren. Für eine Strategie zur vollständigen Erfassung des Objektes sind die Robustheit der patchweisen Rekonstruktion, sowie die qualitative Beurteilung der Höhenstützstellen des Patches von großer Bedeutung. Die Beurteilung des Rekonstruktionsergebnisses fließt in eine übergeordnete Surf-Strategie ein, mit der die Erfassung der gesamten sichtbaren Objektoberfläche erreicht werden soll.

2 Einleitung

Im Rahmen des Projektes VISCUP (Improved vision system for visualisation and decision making in cultural heritage preservation), sollen mit Hilfe eines mobilen Messsystems Skulpturen vermessen und virtuell rekonstruiert werden. Dazu werden 3 Firewire Videokameras, die einen festen Messkopf bilden, benutzt, mit denen das Objekt ausreichend synchron aufge-

¹ Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik, FH Oldenburg/Ostfr./Whv., Ofener Str. 16, 26121 Oldenburg, e-mail: (a.wendt, luhmann, ralph.riede, weisensee)@fh-oldenburg.de

nommen wird (RIEDE et al. 2004). Bei Bedarf wird das Objekt mit künstlicher Struktur beleuchtet, um eine hinreichende Textur für die photogrammetrische Objektrekonstruktion zu gewährleisten. Der dafür erforderliche Musterprojektor befindet sich ebenfalls im Messkopf.

Es existiert eine große Anzahl von Verfahren die sich zur photogrammetrischen Objektrekonstruktion anbieten. Die Gruppe der objektraumorientierten Verfahren stellt dabei die für diese Anwendung geeignetste Methodik dar, da sich geometrische Vorinformationen integrieren lassen, sie nicht auf Stereobilder beschränkt sind und weitere Einflüsse wie Oberflächenreflexionen berücksichtigt werden können.

Für die Rekonstruktion benötigt man orientierte Bilddaten und eine näherungsweise bekannte Objektoberfläche – mindestens eine im Raum liegende Ebene. Da das Messsystem kalibriert vorliegt, sind von jedem Standpunkt die relativen Orientierungen des Bildtripels vorhanden.

Von jedem Aufnahmeort lässt sich eine 3D Punktwolke erzeugen, die dann im Anschluss relativ zu den anderen Standpunkten oder einem globalen System in Bezug gebracht werden muss. Dies geschieht entweder mit am Objekt angebrachten Verknüpfungspunkten oder über natürliche Punkte.

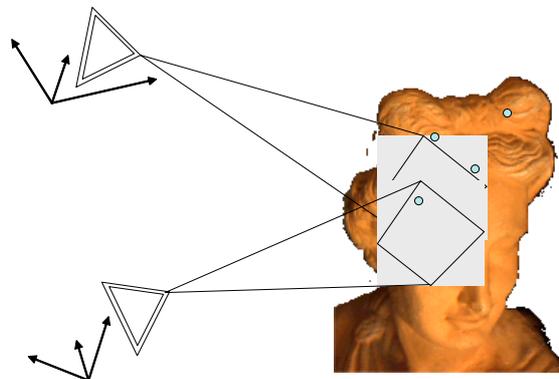


Abb. 1: Patchweise Oberflächenrekonstruktion aus konvergenten Bildtripeln

Abb. 1 zeigt das Prinzip der patchweisen Oberflächenrekonstruktion. Ist ein Patch rekonstruiert wird der Oberflächenbereich beurteilt und entschieden, in welche Richtung weitergesurft werden soll. Es wird die Richtung gewählt, in der die besten Ergebnisse vermutet werden. Der dabei entstehende Überlappungsbereich wird als Vorinformation und zusätzlichen Beobachtungen in den Korrelationsprozess des folgenden Patches integriert. Die Wahl geeigneter Bilder zur Rekonstruktion des Patches geschieht durch die Eintrittswinkel der Bildstrahlen. Bei projizierter Textur können nur synchron aufgenommene Bilder, also das Bildtripel des Messkopfes gemeinsam zur Auswertung genutzt werden. Zur Erhöhung des Konvergenzradius wird mit Bildpyramidenstufen gearbeitet, was unterschiedlichen Frequenzen des Bildsignals entspricht.

3 Korrelationsansatz

Als objektraumorientiertes Verfahren wird der allgemeine Ausgleichungsansatz des Facetten-Stereo-Sehens genutzt, der neben den orientierten Bildstrahlen geometrische Informationen wie 3D Punkte als Beobachtungen berücksichtigt.

Abb. 2 zeigt schematisch das Prinzip des Ausgleichungsmodells. Gesucht ist das geometrische Oberflächenmodell, wobei das radiometrische Oberflächenmodell, was einem „true orthophoto“ entspricht, mitmodelliert wird. Es wird der physikalische Prozess der Bildentste-

hung invertiert, so dass jedes Strahlenbündel eines Bildes direkt in Bezug zum Objekt betrachtet wird. Projiziert man alle Grauwerte von allen beteiligten Bildern in den Objektraum,

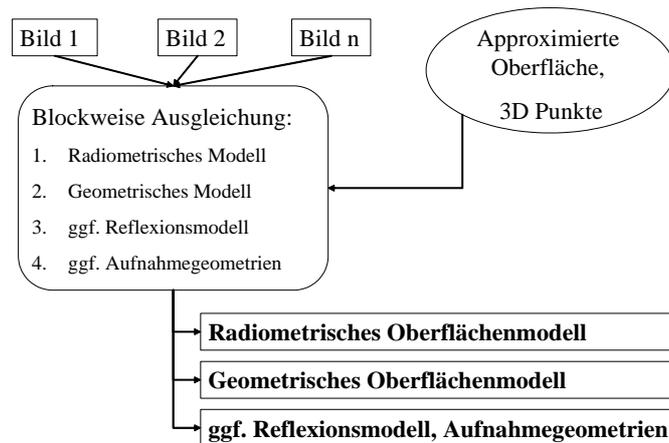
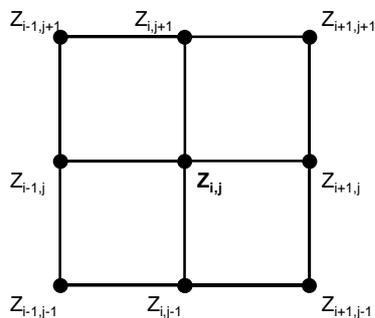


Abb. 2: Multiple Bildkorrelation

werden bei einer nur näherungsweise bekannten Objektoberfläche Grauwertdifferenzen auftreten. Unter der Annahme, dass jeder Oberflächenpunkt mit seiner Umgebung korreliert ist, werden die Grauwertdifferenzen mit Hilfe des lokal wirkenden Gradienten im radiometrischen Modell zu einem iterativen Zuschlag des geometrischen Modells umgewandelt. Die geometrische Oberfläche wird somit flächenhaft rekonstruiert. Gegebenenfalls lässt sich das Ausgleichungsmodell um die Unbekannten der Oberflächenreflexion und Aufnahmegeometrie erweitert, was hinsichtlich einer robusten Ausgleichung aber nicht geschieht. Nur das Reflexionsmodell wird linear innerhalb eines finiten Elementes, womit die Objektoberfläche beschrieben wird, bei Bedarf eingeführt. Weitere Details und Herleitungen sind WENDT (2002) zu entnehmen.

3.1 Regularisierung

In Bereichen fehlender Textur, also homogenen radiometrischen Bereichen, treten Singularitäten in der Normalgleichungsmatrix auf. Zu ihrer Regularisierung werden zusätzliche Informationen oder Bedingungen benötigt. SCHLÜTER (1999) schlägt folgende Krümmungsminimierende Bedingungen vor, die sich als geeignet erwiesen haben.



In X-Richtung:

$$C_{XX}(Z_{ij}) = (Z_{ij-1} - 2Z_{ij} + Z_{ij+1}) + dZ_{ij-1} - 2dZ_{ij} + dZ_{ij+1}$$

In Y-Richtung:

$$C_{YY}(Z_{ij}) = (Z_{i-1j} - 2Z_{ij} + Z_{i+1j}) + dZ_{i-1j} - 2dZ_{ij} + dZ_{i+1j}$$

Diagonal:

$$C_{XY}(Z_{ij}) = (Z_{ij} - Z_{ij+1} - Z_{i+1j} + Z_{i+1j+1}) + dZ_{ij} - dZ_{ij+1} - dZ_{i+1j} + dZ_{i+1j+1}$$

Abb. 3: Bedingungsgleichungen der Regularisierung

Die Bedingungen werden adaptiv eingeführt, so dass sie sich nur in den lokal singulären Bereichen des Patches auswirken. Da die regularisierenden Bedingungsgleichungen rein hypothetisch sind, ist allen gemessenen Informationen den Vorzug zu geben.

3.2 Gemeinsame Ausgleichung

Wie schon erwähnt, lässt der objektraumorientierte Ansatz des Facetten-Stereo-Sehens es zu, in jeder Iteration des photogrammetrischen Korrelationsprozesses 3D Punkte als geometrische Beobachtungen einzuführen.

Aufgrund dieser zusätzlichen Beobachtungen wird nicht nur der Einfluss der hypothetischen Regularisierung minimiert, sondern zudem das Konvergenzverhalten der Ausgleichung beschleunigt (WENDT 2002).

Bei dem vorgestellten Verfahren werden jeweils der zentral liegende Tangentialpunkt, also der Startpunkt und die Normalenrichtung des Patches, sowie die schon rekonstruierten Oberflächenpunkte mit einem frei wählbaren Gewicht einbezogen.

3.3 Robustheit

Aufgrund der sich ausbreitenden Rekonstruktionsstrategie ist es wichtig die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der rekonstruierten Punkte zu beurteilen, um eine adäquate Güte für den Startpunkt des folgenden Patches zu gewährleisten. Dazu lässt sich aus der Varianz für jeden geometrischen Punkt eine Standardabweichung angeben.

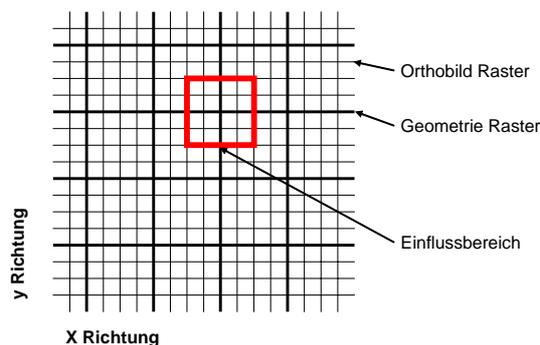


Abb. 4: Einflussbereich der Beurteilung eines rekonstruierten Oberflächenpunktes

Dieses Maß ist nur dann aussagekräftig, wenn genügend Beobachtungen - also Textur oder 3D Punkte - zur Rekonstruktion vorhanden sind. Ist dies nicht der Fall, wird die Schätzung der Unbekannten nur durch die Regularisierung beeinflusst, was die Standardabweichung gegen Null gehen lässt.

Daher haben wir als weiteres Maß zur Beurteilung der Textur die Kriterien des Förstner-Operators (FÖRSTNER 1986) eingeführt. Der Interestoperator basiert auf der Annahme, dass die umliegenden Pixel eines Bildpunktes den Funktionswert verrauscht und verschoben abbilden. Anhand der Größe und Rundheit der Fehlerellipse lässt sich die vorliegende Textur beschreiben.

Aus der Hesse-Matrix

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \sum g_x^2 & \sum g_x g_y \\ \sum g_x g_y & \sum g_y^2 \end{bmatrix},$$

die sich aus den lokal wirkenden Gradienten des Einflussbereiches (s. Abb. 4) bildet, lassen sich das Maß für die Größe der Ellipse

$$w = \frac{\det(\mathbf{H})}{\text{spur}(\mathbf{H})} ; \quad w > 0 \quad (1)$$

und das Maß für die Rundheit der Ellipse

$$q = 4 \frac{\det(\mathbf{H})}{\text{spur}(\mathbf{H}) \cdot \text{spur}(\mathbf{H})} ; \quad 0 \leq q \leq 1 \quad (2)$$

ableiten.

Im Gegensatz zur Lokalisierung eines Interestpunktes kommt es hierbei im Wesentlichen auf das Feststellen von Textur an. Das Maß für die Rundheit, welches die Verteilung der Grauwerte widerspiegelt, ist von untergeordneter Bedeutung. Zur Prüfung vorhandener Textur wird das Maß der Größe der Ellipse zur Beurteilung betrachtet.

4 Textur

In diesem Kapitel wird untersucht, inwieweit die Art der Textur mit der Rekonstruktionsgenauigkeit der Oberflächengeometrie korreliert ist. Ausgehend von dem Idealfall, dass die Textur des Objektes mit der doppelten Frequenz abgetastet wird und eindeutig in allen Wellenlängen der verwendeten Bildpyramide ist, werden Abweichungen vom Idealfall modelliert und ihre Auswirkungen auf die Rekonstruktion der Geometrie gezeigt.

Die Stufen der Bildpyramiden enthalten das tiefpassgefilterte Bildsignal und unterscheiden sich von dem Grad der Filterung. Eine geeignete Textur muss demnach genügend Frequenzen enthalten, damit nach jeder Tiefpassfilterung weiterhin Amplituden im Bildsignal vorliegen.

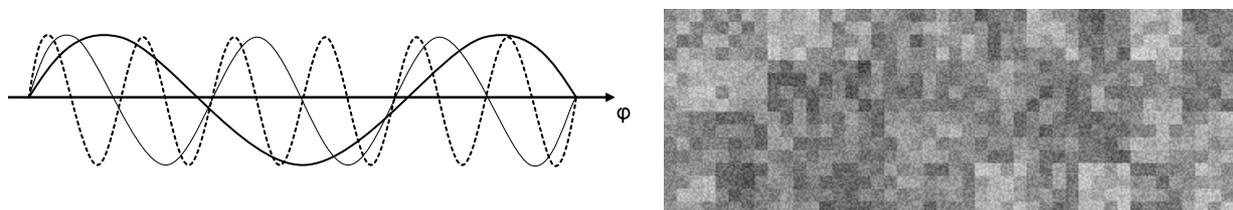


Abb. 5: Überlagerte Wellenlängen der künstlichen Textur

Abb. 5 zeigt eine solche ideale Textur, wie sie im Rahmen dieses Projektes zur Projektion eingesetzt wird. Neben der schematischen Darstellung ist ein Ausschnitt eines Bildsignals zu sehen, welches Wellenlängen von 1, 8, 32 und 128 Pixels enthält.

Liegen unterschiedliche Aufnahmerichtungen vor, ist die Abtastfrequenz an der Oberfläche unterschiedlich, was durch Oberflächenneigungen noch verstärkt wird. Somit werden z.B. bei einer schrägen Aufnahme die hohen Frequenzen einer natürlich texturierten Oberfläche im Gegensatz zur senkrechten Aufnahme nicht erfasst. Die beiden Aufnahmen enthalten damit unterschiedliche Bildsignale bzw. Auflösungen, was zu Ungenauigkeiten in der Bildkorrelation führt.

Die Kameras des Messkopfes sind daher so orientiert, dass sie möglichst aus einer ähnlichen Richtung aufnehmen. Das gewählte Höhen-Basis-Verhältnis zum Objekt beträgt in der Regel 3:1.

5 Surf-Strategie

Zur vollständigen Erfassung von Oberflächen komplexer 3D-Objekte wird eine Strategie benötigt, die im Folgenden erläutert wird.

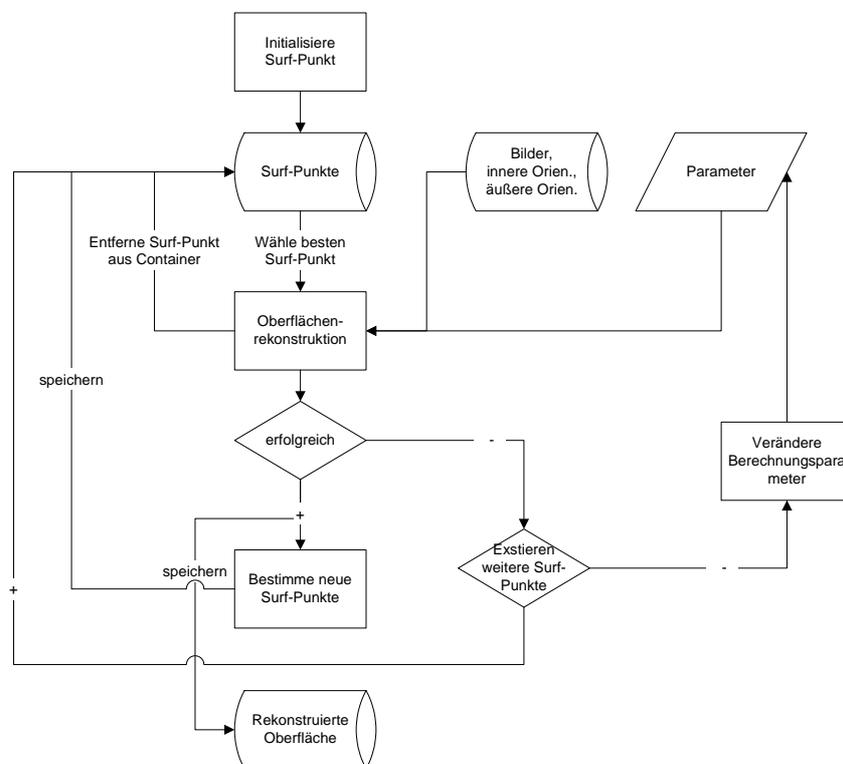


Abb. 6: Surf-Strategie

Zu Beginn muss als Vorinformation ein Punkt mit seiner Oberflächennormalen am Objekt bekannt sein, der als Surf-Punkt bezeichnet wird. Der Surf-Punkt definiert implizit eine Tangentialebene, auf der ein geometrisches Raster für die Oberflächenrekonstruktion aufgespannt wird. Das entspricht einem Patch, in dem die Höhenstützstellen durch Bildkorrelation bestimmt werden. Ist die Rekonstruktion erfolgreich gewesen, werden in den Eckpunkten des Patches neue Surf-Punkte ermittelt. Die Surf-Strategie entspricht einem 3D „Region Growing“ und ist in Abb. 6 näher aufgezeigt.

6 Ergebnisse

Um Genauigkeitsabweichungen, die nicht von der Oberflächenrekonstruktion herrühren, zu vermeiden, werden anfangs synthetische Aufnahmen erzeugt. Dazu werden verschiedene Texturen auf eine Oberfläche mit bekannter Geometrie gelegt. Das erzeugte Höhen-Basis Verhältnis beträgt 3:1. Die Zusammenstellung der Ergebnisse und der Vergleich der rekonstruierten Geometrie mit den Solldaten ist Tab. 1 zu entnehmen.

Die Oberfläche lässt sich mit ca. 30 Oberflächenpatches rekonstruieren. Ein Patch besteht aus einem geometrischen Raster von 15 x 15 Höhenstützstellen, s. Abb. 7. Jedes geometrische Raster enthält wiederum 10 x 10 radiometrische Stützstellen bzw. Oberflächenelemente (Surfel) die eine Größe am Objekt von 0.7 mm repräsentieren. Die 3D Punkte fließen mit einem hohen Gewicht von 1000 und die regularisierenden Bedingungen mit einem Gewicht von 0.1 in die Ausgleichung ein.

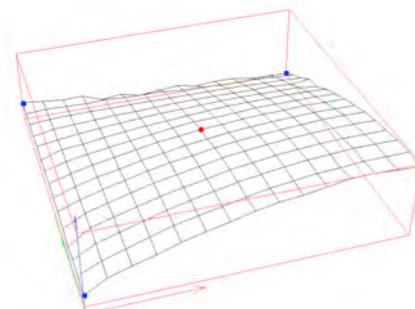
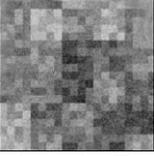
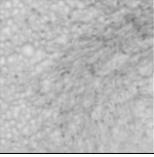


Abb. 7: Oberflächenpatch

Verwendete Texturen	Erfolg des Surfens	Genauigkeitsanalyse (Soll-Ist Vergleich)
 Synthetische Textur	Rekonstruktionsversuche: 6027 Davon fehlgeschlagen: 3590	Mittlere Abweichung: 0.0041 mm Standardabweichung: 0.0717 Das entspricht etwa: 1/10 Surfel
 Muster eines Porenbetonsteins	Rekonstruktionsversuche: 5613 Davon fehlgeschlagen: 3230	Mittlere Abweichung: 0.0041 Standardabweichung: 0.0697 Das entspricht etwa: 1/10 Surfel

Tab. 1: Zusammenstellung der Rekonstruktionsergebnisse

In beiden Fällen der verwendeten Texturen wird die Oberfläche vollständig und mit einer Genauigkeit von ca. 1/10 Surfel rekonstruiert. Zwischen den beiden verwendeten Texturen ist für die Oberflächenerfassung kein signifikanter Unterschied zu erkennen. Das Porenbetonsteinmuster enthält im Wesentlichen Anteile kurzweilliger Signale, die mit der vorliegenden Näherungsgeometrie im Konvergenzbereich der Ausgleichung liegen.

Das Ergebnis der Surf-Strategie zeigt uns zum einen die Anzahl der Rekonstruktionsversuche von Oberflächenpunkten, sowie die Anzahl der davon fehlgeschlagenen. Das Versuche fehlgeschlagen liegt daran, dass nicht genügend Informationen zur Rekonstruktion vorliegen, was in diesem Fall durch die begrenzte Geometrie und damit auch Radiometrie im Objektraum begründet ist. Die Surf-Strategie greift quasi ins Leere und kann aufgrund mangelnder Beo-

bachtungen den Patch nicht rekonstruieren. In diesem Beispiel machen die fehlgeschlagenen Rekonstruktionsversuche mehr als die Hälfte der Berechnungszeit aus. Die Strategie sorgt aber auch dafür, dass jede mögliche Surf-Richtung eingeschlagen wird, um einen Oberflächenbereich zu rekonstruieren.

Die Genauigkeit der Oberflächenrekonstruktion aus natürlichen Daten lässt sich nur schwer verifizieren, da keine Soll-Daten vorhanden sind. Die Bereiche, die nicht rekonstruiert werden konnten, stellen Lücken im Ergebnis dar. Die Lücken treten vornehmlich in Bereichen von starken geometrischen Neigungen und geringer Textur auf.

7 Ausblick

Die photogrammetrische Bildkorrelation stellt ein geeignetes Verfahren zur Objektrekonstruktion komplexer 3D Objekte dar. In dem vorgestellten Verfahren wird patchweise vorgegangen, damit die Parametrisierung der Oberfläche mit einem 2½D Modell geschehen kann und somit die Erfahrungen traditioneller Anwendungen der Bildkorrelation direkt übertragen werden können. Die Bestimmung der Topologie geschieht demnach ebenfalls patchweise und führt in den Überlappungsgebieten zu den Nachbarpatches zu Diskrepanzen. Diese können mit dem sogenannten „Reißverschlussverfahren“ (TURK & LEVOY, 1994) beseitigt werden. Eine weitere Möglichkeit ist, die Oberfläche dreidimensional zu parametrisieren, wie es SCHLÜTER (1999) vorschlägt. Er zeigt wie das Verfahren des Facetten-Stereo-Sehens in den 3D Raum übertragbar ist. Da das Verfahren gute Näherungswerte benötigt, ist die vorgestellte Surf-Strategie in jedem Fall sinnvoll.

Einen Überblick über weitere bildraumbasierte Rekonstruktionsverfahren, die keine Näherungswerte der Objektoberfläche benötigen, stellen (SCHARSTEIN & SZELISKI, 2002) vor. Dabei werden korrespondierende Bildstrahlen mit numerischen Verfahren direkt bestimmt.

8 Literaturverzeichnis

- FÖRSTNER, W., 1986: A feature based correspondence algorithm for image matching. ISP Comm. III, Rovaniemi.
- RIEDE, R., WENDT, A. & LUHMANN, TH., 2004: Synchrone Mehrbildphotogrammetrie zur Aufnahme statischer und dynamischer 3D Objekte. 3. Oldenburger 3D-Tage.
- SCHARSTEIN, D. & SZELISKI, R., 2002: A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms. International Journal of Computer Vision, 47(1/2/3): pp. 7-42.
- SCHLÜTER, M., 1999: Von der 2½ D- zur 3D-Flächenmodellierung für die photogrammetrische Rekonstruktion im Objektraum, DGK, Reihe C, Nr. 506, München.
- TURK, G. & LEVOY, M., 1994: Zippered Polygon Meshes from Range Images. In *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*, pp. 311-318.
- WENDT, A., LUHMANN, TH., TECKLENBURG, W. & WEISENSEE, M., 2003: Passive photogrammetrische Oberflächenerfassung ohne Musterprojektion. GESA-Symposium, Braunschweig.
- WENDT, A., 2002: Gemeinsame Ausgleichung von Laserscannerdaten und digitalen photogrammetrischen Bildern. Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, Heft 02, S. 103-110.
- WROBEL, B., 1987: Digitale Bildzuordnung durch Facetten mit Hilfe von Objektraummodellen. BuL 55, S. 93-101.

Automatic Scale Adaptation of Semantic Nets¹

KIAN PAKZAD² & JANET HELLER²

Zusammenfassung: Diese Arbeit behandelt eine Methode zur Ableitung von Objektmodellen zur automatischen Objektextraktion in Bildern niedriger Auflösung aus Modellen für hochauflösende Bilddaten. Semantische Netze für Bilder hoher Auflösungen werden zuerst zerlegt in Objektteile, die unabhängig voneinander betrachtet werden können. Die Objektteile werden dann angepasst an die niedrigere Auflösung unter Berücksichtigung von Form, Radiometrie und Textur. Für diesen Generalisierungsprozess werden Skalensmodelle benutzt, die das Skalenverhalten verschiedener Objekttypen mathematisch beschreiben. Schließlich werden alle Objektteile zu einem Semantischen Netz fusioniert.

Mit einem ersten Fokus auf linienartigen Objekten, wie z.B. Straßen, wird eine Objektrepräsentation mit Semantischen Netzen beschrieben. Dabei müssen Randbedingungen erfüllt sein, um die Netze an andere Skalen anpassen zu können. Außerdem wird das Verhalten von einigen Kanten- und Linienoperatoren im Skalenraum untersucht. Zum Schluss werden beispielhaft an einem konkreten Objekt Ereignisse bei der Maßstabsänderung eines Bildes beobachtet und deren Einfluss auf das Semantische Netz beschrieben.

1 Introduction

Landscape objects appear differently in remote sensing images of differing resolution. While many object details are visible in high resolution images, in low resolution images many of them disappear or merge. Even the dimensionality can change. Where in high resolution images areas are observable, in low resolution images lines or even points might be found. This fact also affects an automatic extraction of landscape objects from digital images with different resolutions. For an automatic extraction from satellite and aerial images knowledge-based systems with an explicit knowledge representation, such as semantic nets, offer high flexibility and can easily be structured (PAKZAD, 2001). This knowledge representation contains the object models, which describe the objects with all relevant parts and characteristics. As described above the models for the same objects have to be different depending on the resolution of the images. They are tailored to specific scales of aerial and satellite images. Decision about the best scale for object detection is mostly still made intuitively (SCHIEWE, 2003). In (BAUMGARTNER, 2003), the representation of roads in a small and a large image scale is combined in a semantic net. However, the fusion of the two scales is solely used for increasing the reliability of the extraction results.

Existing approaches for explicit object models do not permit an automatic transfer to other scales. Hence, a new model is to be developed for each image scale manually. For the case of scale reduction, a description of object behaviour is possible though, as investigations of features in scale-space indicate (WITKIN, 1986). The scale-space theory was formulated for a multi-scale representation of objects, depending only on one parameter for scale. Following this theory, with increasing scale parameter, i.e. lower spatial resolution, new details will not appear, but existent details will disappear and merge with each other (LINDBERG, 1994). The object representation in image data of lower spatial resolution can therefore be predicted starting from high resolution. A methodology for an automatic adaptation of object models to lower spatial resolutions would make the manual generation of these object models for dif-

¹ Dieser Text ist eine modifizierte Version eines auf dem XX. ISPRS-Congress in Istanbul 2004 eingereichten Beitrages.

² Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover, Nienburger Str. 1, 30167 Hannover, e-mail: pakzad@ipi.uni-hannover.de, heller@ipi.uni-hannover.de

ferent resolutions redundant. Thus, a once created object model could be utilised for a wider range of applications and for diverse sensor types exhibiting a wider range of image scale.

This paper therefore presents an approach to derive object models for low resolution images from models created manually for high resolution images. Although the contents of scale-space theory were widely applied to many image processing tasks, e.g. for edge and line detection algorithms (LINDBERG, 1998), the connection to semantic net object representation for knowledge based image analysis is new.

Section 2 gives an overview about the general strategy of the procedure and briefly describes the different steps. Section 3 focuses on the composition of the semantic nets and suggests some constraints, in order to be able to handle the semantic nets automatically regarding scale adaptation. The semantic nets represent the high level processing of the image interpretation task, but also the low level processing, which is directly connected to the nets, has to be observed. Section 4 describes tests on the scale behaviour of some feature extraction operators, and section 5 contains an example for scale change events observed in a scene and their impact on the semantic net.

2 Strategy for Scale Adaptation

This section gives an overview of the proposed strategy for scale adaptation. As shown in Fig.1, the main input of the process is a manually created object model, represented as a semantic net, with the description of that object, which has to be extracted from images. The details of the object description are adjusted to a large start scale. Object parts, which are not observable at that scale, are also not represented in the object model. The automatic creation of the semantic net requires some constraints in order to be able to adapt the net to another scale. These constraints are described in section 3. The second input of the process is the target scale, which has to be smaller than the start scale.

The first step is a decomposition of the semantic net. The goal of the decomposition is to identify parts of the semantic net, which can be processed separately. These parts can consist of single object parts or blocks of them, if the object parts influence each other during scale adaptation: E.g. two objects with a small distance to each other possibly have to be adapted together (depending on the target scale), because during the scaling process the small distance can disappear and objects can merge.

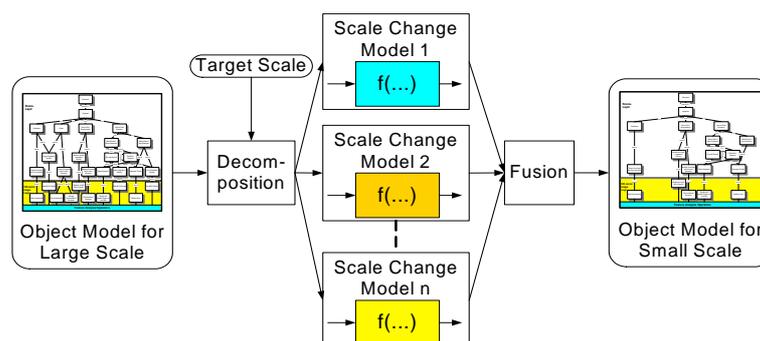


Figure 1: Strategy for scale adaptation

The next step is the scale adaptation of the decomposed parts themselves. The selected object parts and blocks have to be generalized. In this process different aspects have to be taken into account: It is possible that the object type changes as well as the object attributes. All objects of the same object type exhibit a comparable behaviour in scale change and can be extracted by the same group of feature extraction operators.

For the scale adaptation of the elements we intend to use scale change models. Scale change models describe the kind of change of a certain object type depending on the value of scale change. Different attributes, such as the grey value contrast of the object to the neighbours or the spatial measurements, are used as input parameters for the scale change models. The decision, of how to change the object parts or the blocks, has a direct connection to the question of how they can be extracted after scale change by using feature extraction operators. If it is necessary to change the feature extraction operators after scale change, the object type has changed. Hence, the scale behaviour of feature extraction operators has to be taken into account. In section 4 we describe first results of some examinations, aiming to determine the suitable scale range for certain feature extraction operators.

The last step is the fusion of the adapted object parts to a complete semantic net, which describes the object in the smaller scale and which can be used for an automatic object extraction in low resolution images.

3 Composition of suitable Semantic Nets

The knowledge representation in this approach uses the form of the semantic nets of the knowledge based system AIDA (LIEDTKE et al., 1997, TÖNJES, 1999). This system was developed for automatic interpretation of remote sensing images. Semantic nets (NIEMANN et al., 1990) are directed acyclic graphs. They consist of nodes and edges linking the nodes. The nodes represent the objects expected in the scene while the edges model the relations between these objects. Attributes define the properties of nodes and edges.

The concept of semantic nets for the extraction of particular objects enables many possibilities for the generation and composition of a particular object model, i.e. the representation of an object model for the extraction of an object can be realized with different semantic nets. Based on the goal of this research – adapting semantic nets automatically to a smaller scale – it is necessary to find rules for the generation of semantic nets.

The semantic nets to be created should satisfy the following constraints:

- They should have a structure, which enables to analyse them automatically regarding scale behaviour. The structure should enable an automatic decomposition of the semantic net into suitable parts in order to treat them separately.
- They should describe the objects completely with all characteristics and attributes that are important for the extraction of the objects in the starting scale.
- They have to be suitable for an automatic extraction of the objects from digital images. The semantic net should contain a refinement of the whole object into suitable parts, which can be extracted directly by using certain feature extraction operators.
- They should be easy to create by using standard language. The rules should direct the experts in creating the semantic nets, not complicate it. Otherwise advantages of semantic nets and expert systems, like the explicit knowledge representation, would be lost.

In this stage of our research, we focus on roads and road markings. As a further specification, the focus lies on objects which run for a long distance parallel to the road axis along the road. That means we deal with objects such as lane markings, but not with objects such as zebra crossings. We are able to describe such objects with the object types periodic and continuous stripes and lines. The semantic nets, which we create for such objects, contain only these four object types. We represent roads first by describing the entire stripe (the pavement) as the basis object and, as part of a road, the markings on it (see Fig.4). As a rule, only the objects at

the bottom layer will be extracted. That means for Fig.5 the object will be extracted by finding its line markings.

The nodes of the semantic net represent objects. We define for every object of the semantic net the following attributes:

- Object Name: The description of the object by its name in standard language.
- Object Type: All objects of the same object type have a comparable behaviour in scale change and can be extracted by the same group of feature extraction operators. For the description of streets we define four object types: continuous stripe, periodic stripe, continuous line and periodic line. This also affects the group of feature extraction operators, which are used to extract the object type. The difference between stripe and line is given by the width of the object. We define that lines are not wider than 2 pixels. For the extraction of lines in raster images other feature extraction operators will be used than for the extraction of stripes. Stripes would be extracted by finding the edges. The specification periodic or continuous indicates dashed or continuous lines and stripes respectively.
- Grey Value: This attribute describes the radiometric characteristic of the object.
- Extent: This value describes the width of the object and is independent from resolution, i.e. is stated in meters, not in pixels.
- Periodicity: For periodic object types this attribute expresses the ratio of the length of the lines/stripes and the extent. For continuous object types this attribute has no meaning.

The relations, which are used in the presented net in Fig.4, are part-of and spatial relations. Some of the part-of relations have additional attributes, as “central” or “left/right boundary”. The attribute “central” can be used to guide the object extraction. The attribute “left/right boundary” has an important function regarding the scale adaptation: part-of relations with these attributes describe the boundary parts of an object. These parts are important, if neighbouring objects exist. In that case the border parts of both neighbouring objects have to be considered, because they can affect each other as scale varies. The spatial relations play a key role in the object description, because they directly affect the necessary modifications for scale adaptation of the nets. It is essential that the position of all object parts is clearly specified by spatial relations. For the examined objects, the position perpendicular to the street axis has to be described. We use the relations left-of and right-of for this description. Furthermore, attributes are important for the description of the distances. Usually, it is not possible to describe the exact distance to another object. We therefore use ranges for distances here. The magnitude of the distances is also expressed in meters, independently from scale. All nodes of the semantic net are connected to feature extraction operators, which are able to extract the represented objects. But the strategy of object extraction is to call the feature extraction operators only for the nodes without parts, corresponding to the nodes at the bottom of the semantic net. In Fig.4 the node “Roadway” contains a connection to a feature extraction operator, which is able to extract stripes with the given constraints. But as long as markings on the stripe are extractable in the target scale, the extraction of “Roadway” would be realized by the extraction of the markings.

Based on these semantic nets the scale behaviour of the defined object types can be investigated. Taking into account single object parts, the following behaviour is possible:

Nr	Before Scale Change	After Scale Change
1	<i>Continuous Stripe (CS)</i>	<i>CS or CL or Invisible</i>
2	<i>Continuous Line (CL)</i>	<i>CL or Invisible</i>
3	<i>Periodic Stripe (PS)</i>	<i>PS or CS or PL or CL or Invisible</i>
4	<i>Periodic Line (PL)</i>	<i>PL or CL or Invisible</i>

Table 1: Object Type Scale Behaviour of Single Objects

Unfortunately, these four possibilities are not sufficient for an automatic scale adaptation of the semantic nets. It is also possible that different parts affect each other during scale change. As an example, two stripes with a small distance apart will merge at a certain scale. Hence, neighbouring parts have to be analysed simultaneously in this case.

Taking into account object pairs, which might affect each other, the following possibilities can be found:

Nr	Before Scale Change	After Scale Change
5	<i>Cont. Stripe – any</i>	<i>CS or CL or Invisible</i>
6	<i>Per. Stripe – Per. Stripe</i> <i>Per. Stripe – Cont. Line</i> <i>Per. Stripe – Per. Line</i>	<i>PS or CS or PL or CL or Invisible</i>
7	<i>Cont. Line – Cont. Line</i> <i>Cont. Line – Per. Line</i>	<i>CL or Invisible</i>
8	<i>Per. Line – Per. Line</i>	<i>PL or CL or Invisible</i>

Table 2: Object Type Scale Behaviour of Object Pairs

This scale behaviour of the object types has to be used for the adaptation of the semantic concept nets. It is possible, that a given range in a concept net for a distance between two objects will lead in combination with a given target scale after scale adaptation to different possibilities for the new object type. In that case different possibilities have to be included in the new concept net as representation of one object. The question, at which target scale the object type changes is directly connected to the scale behaviour of feature extraction operators. This problem is addressed in the next section.

4 Scale Behaviour of Feature Extraction Operators

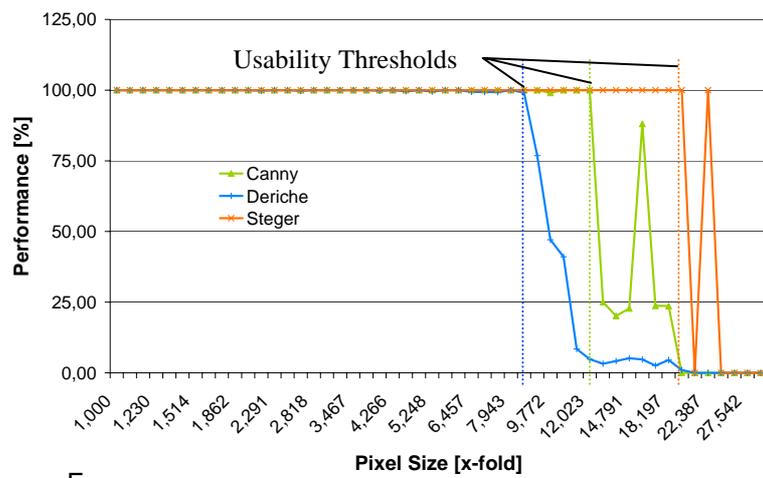
As described in section 3, the object type of a node in a semantic net is also determined by the feature extraction operator, which is bounded to the nodes of a certain object type and is used for its extraction. Objects of different types use different feature extraction operators. But as scale varies the object type may change, because the same operator is not able to extract the same object type successfully at all resolutions. In order to be able to predict from which scale on the object type has to change, an analysis is necessary about the scale range, in which the feature extraction operators are usable. The performance of three commonly used higher developed operators for edge and line detection are exemplarily examined - Canny (CANNY, 1986), Deriche (DERICHE, 1987) and Steger (STEGER, 1998). The goal of this investigation is to analyse the behaviour of the operators in sensor data of different resolutions. For that in a first step the different sensors are simulated by creating synthetic images of different resolutions and applying the operators on them.

The generated synthetic grey value image has a size of 1000x1000 pixels and also is composed of a bright line with two pixel width stretching over the entire image on dark background. An image pyramid was created from this synthetic image by Gaussian interpolation.

In these pyramid images, the feature extraction operators were run, varying the values for contrast (between line and background) and noise.

The edge and line detection algorithms were optimised for the smallest pixel size of the image pyramid, i.e. the resolution of the creation stage. The described parameters were maintained for the edge and line detection in all pyramid images. The images were all processed with the same procedure (same operators with the same parameter values) to ensure comparability of the results. In this paper we call one and the same operator with different parameters as different operators. Performance of the operators was obtained by recording the ratio of the actual edge and line length of the operator in the image to the expected well known length of the edges and line. All operators yield 100% performance in the first stage.

The dependence of the feature extraction operator's performance on image resolution was analysed. The performance is gradually decreasing for lower resolutions. Fig.2 shows the performance curves of the operators in the highest resolution image of pixel size 1.0 with a grey value difference between the dark background and the white line of 240 and a noise amplitude of 3, corresponding to approximately 1% of the grey value range. This noise level was chosen to simulate a realistic noise impact on digital images.



F

Figure 2: Performance of the Canny, Deriche and Steger Operator

As can be seen, the performance curves of the three examined operators behave quite differently. The difference in the shape of the performance curves is not only due to the operator itself, but is dependent on the chosen parameters in the implementation as well. The choice of the threshold values mainly determines at which pixel size the good performance breaks off. While the Deriche operator's best performance more or less ends abruptly, the performance of the Canny and Steger operators oscillates over a certain range of resolution before failing to detect features. The results of these two operators in these resolution ranges must be regarded as unreliable. Feature extraction at these and lower resolutions cannot be carried out with these operators under the preference of the chosen parameters. The derived usability thresholds are marked in Fig.2.

Contrast in the image plays an important role in feature extraction and influences the operator's performance. Fig.3 depicts the performance limits for the three operators with a given noise level of 1% depending on the grey value differences between the dark

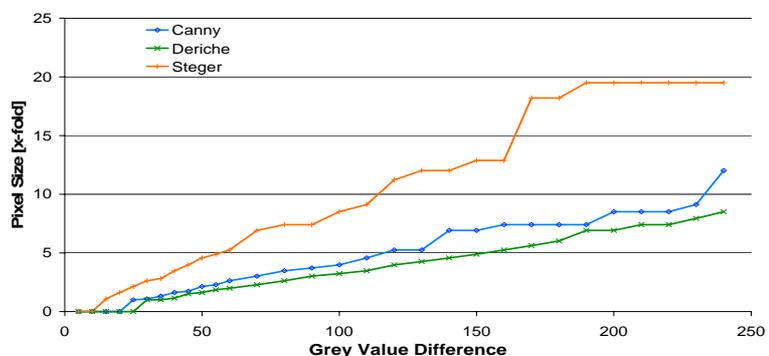


Figure 3: Usability Range of Canny, Deriche and Steger Operators with varying Contrast

background and the lighter line. A pixel size of zero means there were no operator responses even in the highest resolution of 1.00 because of insufficient contrast.

5 Example for Scale Adaptation

For an exemplarily chosen application of a dual carriageway we created a semantic net following the developed constraints as described in section 3. Fig.4 shows our test image, a cut-out from an aerial image with a ground pixel size of 3.3 cm. The goal of this section is to show that the proposed kind of semantic net is suitable to follow the scale space events in digital images, and is therefore suitable to be used in an automatic approach.

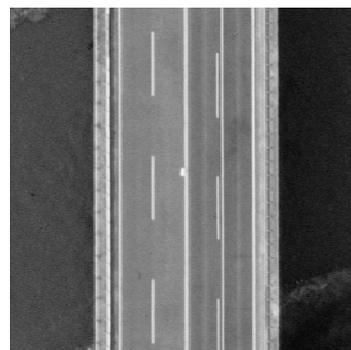


Figure 4: Aerial Image, Dual Carriageway

In the concept net, as presented in Fig.5, the roadway is modelled as a continuous stripe with certain ranges for grey values and extent, i.e. width. The roadway itself is composed of various parts, the road markings and roadway margins. While the road markings are of the object type periodic or continuous line, the object type of the margins is a continuous stripe. Attributes for grey value, extent and periodicity are assigned to the object parts of the roadway as well. The declaration of the spatial relations between these object parts is essential for the scale adaptation process, as previously described in section 3. Here, the distance $d1$ represents the width of a single lane, $d2$ corresponds to the distance between the outmost edge line and the roadway margins and $d3$ locates the optional road work marking from the outmost edge line. All nodes of the net are connected to the appropriate feature extraction operators, but only the operators connected to the bottom nodes are used. In addition, the boundary object parts are labelled to facilitate the search for adjacent objects. With this information groups of objects can be formed, which have to be analysed in conjunction regarding scale space behaviour.

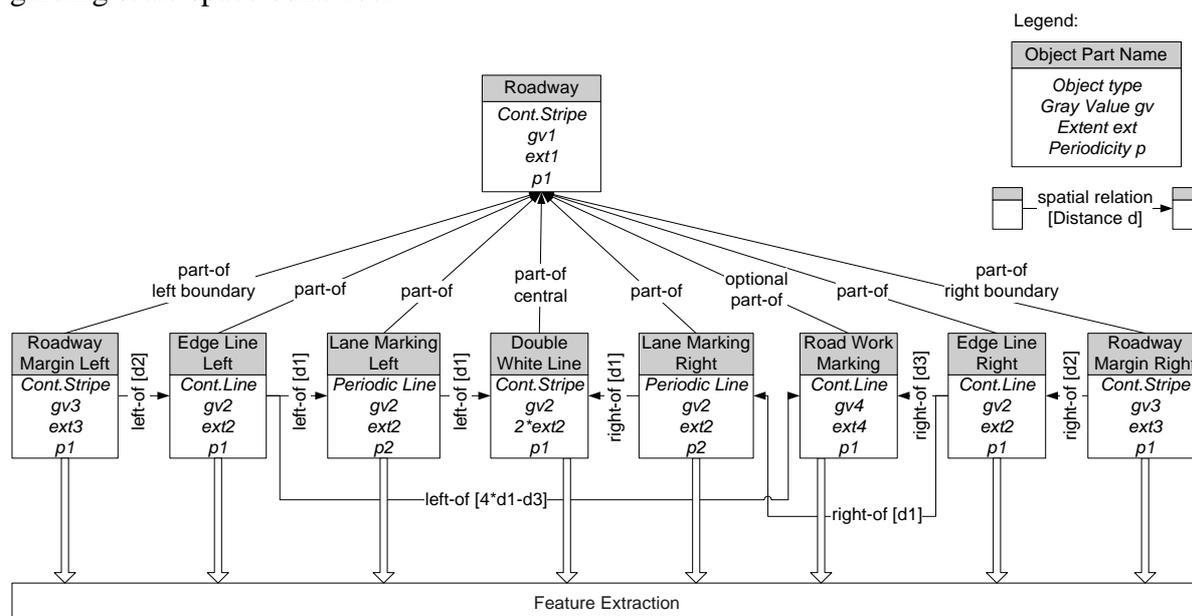


Figure 5: Concept Net for Dual Carriageway at Largest Scale, Ground Pixel Size of 3.3 - 7 cm/pel

The following semantic nets represent some instance nets of the adaptations to smaller scales of this particular roadway scene. The adaptations are done manually based on a visual inspection of larger ground pixel sizes, i.e. smaller scales of the image as seen in Fig.4. The adapted nets correspond to a selection of smaller scales. At these scales at least one event in scale space necessitates the adaptation of the previous net, which is appropriate for a larger scale.

As scale is decreased, first the object type of the central object part, the double white line, changes from continuous stripe to continuous line, cf. Fig.6. Secondly, the road work marking merge with the neighbouring right lane marking due to the small separating distance between them. Since road work marking is an optional part, the term of the lane marking is maintained for the name of the resulting object part. The attributes of this modified object part, however, change. The resulting object type is continuous line.

With further decreasing of scale the edge line markings merge with the roadway margins, both left and right side. Fig.6 depicts the semantic net adapted to this scale. The nodes of the edge line markings are combined with the nodes of the roadway margins, resulting in new values for the attributes, grey value and extent. Since these new object parts are now located at the border of the entire object dual carriageway, they have to be labelled as boundary objects. Even though

the feature extraction operators are not included in Fig.6, the connections to the nodes still exist and the operators are called for the extraction of the bottom object parts in the image.

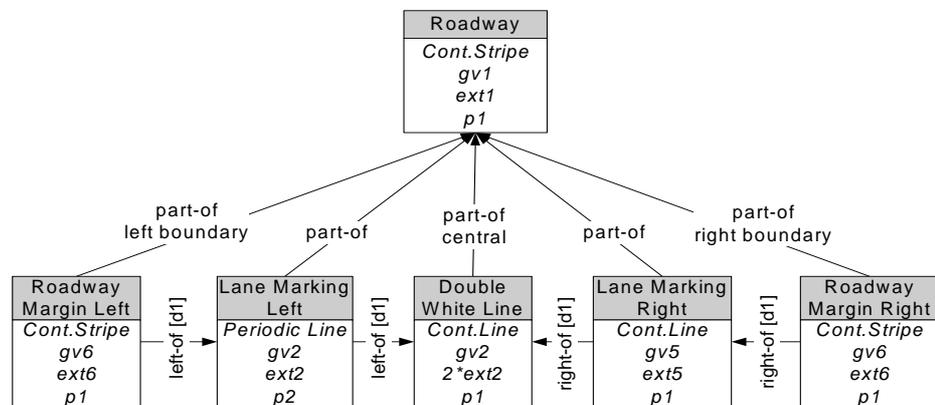


Figure 6: Instance Net for Dual Carriageway for 0.9 m/pel

When the scale gets so small that single

lines are not detectable anymore, the lane markings vanish. Distances between the remaining object parts, double white line and roadway margins have to be modified, cf. Fig.7. The stripes of the roadway margins shrink to 2 pixels in width and thus, the object type changes to a cont. line.

In the next stage of the net adaptation process, the net consists merely of the roadway itself - the only feature that is still left detectable at that scale. The feature extraction operator connected to the roadway

node will now be called to extract a continuous stripe, as the roadway has become the bottom node. At last, the object type changes from continuous stripe to continuous line before the line vanishes and there is no roadway or part thereof extractable in the example scene.

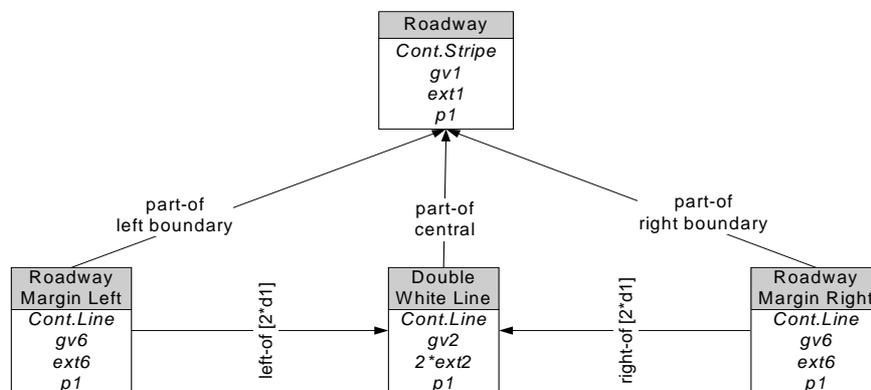


Figure 7: Instance Net for Dual Carriageway for 1.7 m/pel

5 Conclusion

In this paper an approach to derive object models for low resolution images from models created manually for high resolution images was presented. We focussed on the composition of the semantic nets and suggested some constraints, in order to be able to handle the semantic nets automatically regarding scale adaptation. The prediction of the scale behaviour of object types requires investigations on the scale behaviour of feature extraction operators, which we presented for three operators. At last, we described an example for scale change events observed in a scene and their impact on the semantic net. This example demonstrates the suitability of the proposed kind of semantic net to follow the scale space events in digital images, and thus, its applicability in an automatic approach.

Future work will deal with the specification of the exact steps of an automatic scale adaptation of semantic nets. Furthermore, we intend to work on extensions of the described semantic nets to new object types, and the impacts on the semantic net creation rules. Regarding the investigation of the feature extraction operators (section 4) an exact simulation of sensor data in different resolutions would require the incorporation of more complex models than we used. We assume that the used procedure is sufficient for our task. Yet, this assumption still has to be verified by using real sensor images. Eventually, the comparison of our results with predictions from scale space theory is surely interesting.

7 Acknowledgements

This work has been funded within a project by the Deutsche Forschungsgemeinschaft under grant HE 1822/13.

8 Literaturverzeichnis

- BAUMGARTNER, A., 2003. Automatische Extraktion von Straßen aus digitalen Luftbildern. DGK, Reihe C, Dissertationen, Nr. 564, München, 91 S.
- BÜCKNER, J., 2003. Ein wissensbasiertes System zur automatischen Extraktion von semantischen Informationen aus digitalen Fernerkundungsdaten. Schriftenreihe des TNT der Universität Hannover, Band 4, ibidem-Verlag, Stuttgart, 162 S.
- CANNY, J., 1986. A Computational Approach to Edge Detection. - IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8(6), S. 679-698.
- DERICHE, R., 1987. Using Canny's Criteria to derive a Recursively Implemented Optimal Edge Detector. - International Journal of Computer Vision, 1(2), S. 167-187.
- LIEDTKE, C.-E., BÜCKNER, J., GRAU, O., GROWE, S., und TÖNJES, R., 1997. AIDA: A system for the knowledge based interpretation of remote sensing data. 3rd. Int. Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Band II: S. 313-320.
- LINDEBERG, T., 1994. Scale-Space Theory in Computer Vision. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 423 S.
- LINDEBERG, T., 1998. Edge Detection and Ridge Detection with Automatic Scale Selection. - International Journal of Computer Vision, 30(2), S. 117-154.
- NIEMANN, H., SAGERER, G., SCHRÖDER, S. und KUMMERT, F., 1990. ERNEST: a semantic network system for pattern understanding. - IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 12(9), S. 883-905.
- PAHL, M., 2003. Architektur eines wissensbasierten System zur Interpretation multi-sensorieller Fernerkundungsdaten. Schriftenreihe des TNT der Universität Hannover, Band 3, ibidem-Verlag, Stuttgart, 145 S.

- PAKZAD, K., 2001. Wissensbasierte Interpretation von Vegetationsflächen aus multitemporalen Fernerkundungsdaten. DGK, Reihe C, Dissertationen, Nr. 543, München, 104 S.
- SCHIEWE, J., 2003. Auswertung hoch auflösender und multisensoraler Fernerkundungsdaten. Habilitationsschrift, Fachgebiet Umweltwissenschaften, Schwerpunkt Geoinformatik, Hochschule Vechta, 159 S.
- STEGER, C., 1998. An Unbiased Detector of Curvilinear Structures. - IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 20(2), S.113-125.
- TÖNJES, R., 1999. Wissensbasierte Interpretation und 3D-Rekonstruktion von Landschaftsszenen aus Luftbildern. Dissertation, Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 10, Nr. 575, VDI-Verlag, Düsseldorf, 117 S.
- WITKIN, A., 1986. Scale space filtering. In Pentland, A. (Ed.): From Pixels to Predicates. Ablex Publishing Corporation, New Jersey, S. 5-19.

Extraction of Field Boundaries and Wind Erosion Obstacles from Aerial Imagery¹

MATTHIAS BUTENUTH²

Abstract: In this paper work on image analysis methods extracting field boundaries and wind erosion obstacles from aerial imagery is presented. Describing the objects of interest and additional GIS-data together in an integrated semantic model is essential to get an overview of the numerous relations between the different objects and how to exploit the prior knowledge. The field boundaries and wind erosion obstacles are first extracted separately: A segmentation within selected regions of interest in the imagery leads to field areas, which are split, if necessary, to preliminary fields. Furthermore, a snake algorithm is initialized to correct the geometric inaccuracies in some parts yielding final field boundaries. Wind erosion obstacles are derived using DSM-data in addition to the imagery to verify search areas from the prior GIS knowledge, for example parallel and nearby roads, or to extract wind erosion obstacles without prior information about their location. Finally, a combined evaluation of the different objects is accomplished to exploit the modelled geometrical similarities resulting in a refined and integrated solution.

1 Introduction and Motivation

In this paper work on image analysis methods extracting field boundaries and wind erosion obstacles from aerial imagery is described. This data is needed for various applications, such as the derivation of potential wind erosion risk fields for geo-scientific questions, which can be generated with additional input information about the prevailing wind direction and soil parameters, as described in (THIERMANN ET AL. 2002). Another area is the agricultural sector, where information about field geometry is important for tasks concerning precision farming or the monitoring of subsidies (ANDERSON ET AL. 1999).

In the past, several investigations have been carried out regarding the automatic extraction of man-made objects such as buildings or roads, see for example (MAYER 1998). Similarly, investigations regarding the extraction of trees have been accomplished, see (HILL & LECKIE 1999) for an overview of approaches suitable for woodland and (STRAUB 2003) for a method to extract trees not only capable for woodland but also in the open landscape. It has to be investigated, to what extent these approaches are usable for extracting wind erosion obstacles such as hedges or tree rows, and also which enhancements are necessary to realize the proposed strategy here. In contrary, research with respect to the extraction of field boundaries from high resolution imagery is still not in an advanced phase: (LÖCHERBACH 1998) presented an approach to update and refine topologically correct field boundaries by a fusion of raster-images and vector-map data. Focusing on the reconstruction of the geometry and features of the land-use units, the acquisition of new field boundaries is not discussed. In (TORRE & RADEVA 2000) a so called region competition approach is described, which extracts field boundaries from aerial images with a combination of region growing techniques and snakes. To initialize the process, seed regions have to be defined manually, which is a time and cost-intensive procedure. In (APLIN & ATKINSON 2004) a technique for predicting missing field boundaries from satellite images is presented, using a comparison of modal land

¹ This paper is a slightly modified version of (BUTENUTH 2004)

² Matthias Butenuth, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover, Nienburger Str. 1, 30167 Hannover, e-mail: butenuth@ipi.uni-hannover.de

cover and local variance. The approach involves manual post processing, because only fields with a high likelihood of missing boundaries are identified, not field boundaries directly. The aim of the solution, presented in this paper, is a fully automatic extraction of field boundaries from high resolution aerial CIR-imagery. Consequently, the proposed strategy differs from the mentioned approaches. In addition, relationships between the objects of interest – field boundaries and wind erosion obstacles – will be exploited to improve the results.

In general, the recognition of objects with the help of image analysis methods starts frequently with a modelling of the objects of interest and the surrounding scene. Furthermore, exploiting the context relations between different objects leads to a more overall and holistic description, see for example (BUTENUTH ET AL. 2003). The use of prior knowledge (e.g. GIS-data) supporting object extraction can lead to better results as shown in (BALTSAVIAS 2004). These aspects are incorporated modelling the extraction of field boundaries and wind erosion obstacles and are reflected in the derived integrated strategy. Initially, the integration of vector and raster data in one semantic model is briefly described in the next section to obtain an overview of the numerous relations between the objects to be extracted and the prior knowledge. Afterwards, the strategy and approach to extract field boundaries and wind erosion obstacles is explained, followed by results to demonstrate the potential of the proposed solution. Finally, further work required is discussed in the conclusions.

2 Semantic Model for the Integration of GIS-data and Aerial Imagery

Describing the integration of GIS-data with aerial imagery in one semantic model is the starting point for object extraction (BUTENUTH 2004). The semantic model is differentiated in an object layer, consisting of the real world, a GIS-layer, a geometric and material part, as well as an image layer (cf. Figure 1). The model is based on the assumption, that the used CIR-images are generated in summer, when the vegetation is in an advanced period of growth. The use of prior knowledge plays an important role, which is represented in the semantic model with an additional GIS-layer. Vector data of the ATKIS DLMBasis (German Authoritative Topographic-Cartographic Information System) is used: (1) Field boundaries and wind erosion obstacles are exclusively located in the open landscape, thus, further investigations are focused to this area. The open landscape is not directly modelled in the ATKIS DLMBasis, this is why this information has to be derived by selecting all areas, which are not settlements, forests or water bodies. (2) The road network, rivers and railways can be used within the open landscape as prior knowledge: The geometries of the GIS-objects are introduced in the semantic model with a direct relation from the GIS-layer to the real world (cf. Figure 1). For example, the ATKIS objects 3101 (road) and 3102 (path) are linked to the road segment of the real world and, thus, are usable as field boundaries (e.g. a road is a field boundary). The modelling of the GIS-objects in the geometry and material layer together with the image layer is not of interest, because they do not have to be extracted from the imagery (depicted with dashed lines in Figure 1). (3) Tree rows and hedges are only captured in the ATKIS-data, if they are longer than 200 m and lie along roads or are formative for the landscape. Therefore, the relation from the GIS-layer to the real world is limited and a modelling in the image layer is also required.

The first object to be extracted, the *field*, is divided in the semantic model in *field area* and *field boundary* in order to allow for different modelling in the layers: The field area is a 2D vegetation region, which is a homogeneous region with a high NDVI (Normalized Difference

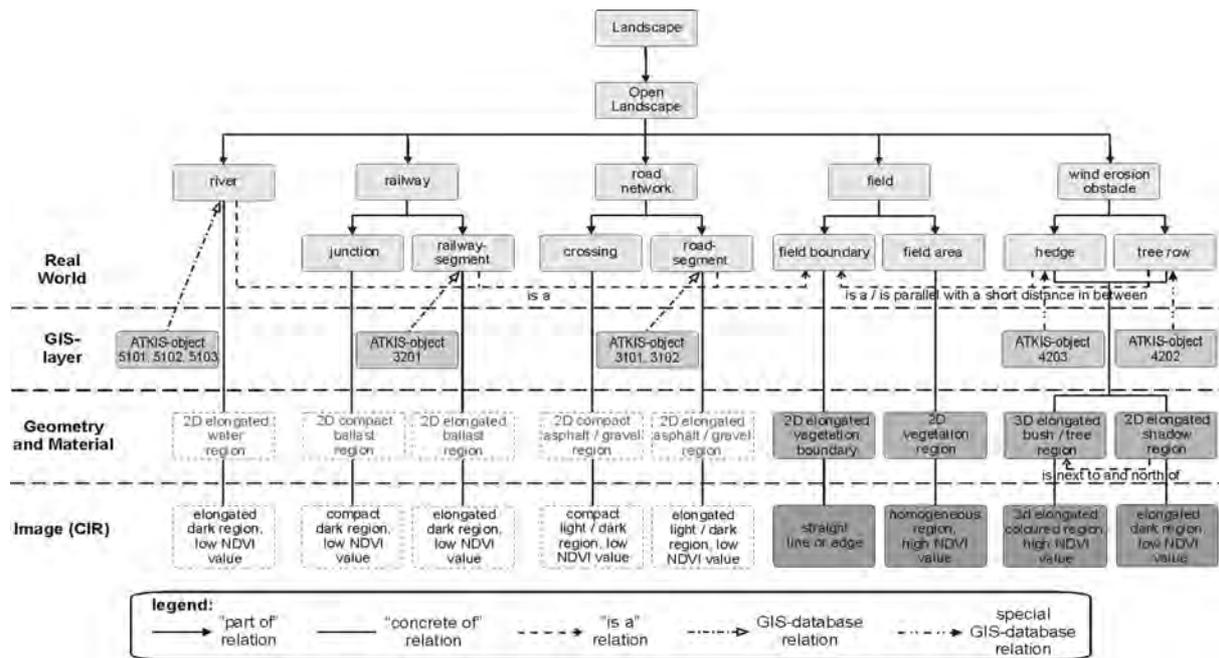


Fig. 1: Semantic Model

Vegetation Index) value in the CIR-image. The field boundary is a 2D elongated vegetation boundary, which is formed as a straight line or edge in the image. Both descriptions lead to the desired result from different sides. The second object to be extracted, the *wind erosion obstacle*, is divided in *hedge* and *tree row* due to different available information from the GIS-layer. Afterwards, both objects are merged, because modelling in the subsequent layers is identical. In addition, the wind erosion obstacles are not only described by their direct appearance in geometry and material, but also with the fact, that due to their height (3D object) there is a 2D elongated shadow region next to and in a known direction (e.g. northern direction at noon). Therefore, the “concrete of” relation not only consists of an elongated, coloured region with a high NDVI value, but additionally of an elongated dark region with a low NDVI value alongside the real object of interest in a known direction. The integrated modelling leads in particular to relationships between the field boundaries and wind erosion obstacles, thus, inside the layers of the semantic model (cf. Figure 1): One object can be part of another one or be parallel and nearby, and together they form a network in the real world. For example, wind erosion obstacles are not located in the middle of a field, because of disadvantageous cultivation conditions, but solely on the field boundaries. Accordingly, the geometries of these different objects are identical or at least parallel with a short distance in between in the case of location alongside roads, rivers or railways.

3 Strategy to Extract Field Boundaries and Wind Erosion Obstacles

3.1 General Strategy

The general strategy for the extraction of field boundaries and wind erosion obstacles is derived from the modelled characteristics of the objects taking into account the realization of an automatic process flow. CIR-images, GIS-data and a Digital Surface Model (DSM) are the input data to initialize the flowchart: Firstly, field boundaries and wind erosion obstacles are

extracted separately with two different algorithms. At a later date, a combined evaluation of the preliminary results due to the modelled geometrical and thematic similarities of the objects is essential getting a refined and integrated solution.

The strategy extracting the *field boundaries* separately starts with the derivation of the open landscape from the GIS-data. In addition, within the open landscape, regions of interest are selected using the road network, rivers, railways, tree rows and hedges as borderlines in order to handle the large datasets in an appropriate manner (cf. Figure 3 for an example of a selected region of interest). Consequently, the borderlines of the regions of interest are field boundaries, which are already fixed, and the image analysis methods are focused to the field boundaries within the regions of interest. The homogeneity of the vegetation of each field enables a segmentation of field areas, processed in a coarse scale to ignore small disturbing structures. Identical vegetation of neighbouring fields leads to missing field boundaries, which can be derived by a line extraction in a finer scale. Further knowledge will be introduced at this time to exploit GIS-data, which gives evidence of field boundaries within the selected regions of interest. The derived field boundaries are in some parts inaccurate and a snake algorithm is initialized to refine their geometric accuracy. The strategy extracting the *wind erosion obstacles* separately starts with a differentiated exploitation of the GIS-data. Focussing on the open landscape, search buffers are defined using the prior knowledge from the GIS-data: Search areas for potential wind erosion obstacles are located alongside roads, rivers or railways as described in the semantic model (cf. section 2) and have to be verified using imagery and DSM-data. In contrary, there is no prior information about the location of all other wind erosion obstacles available. In addition to the extraction of high NDVI-values and higher DSM-values than the surrounding area, characteristics of the wind erosion obstacles as straightness, a minimum length, width and height have to be considered. The aim of the combined evaluation of the preliminary results is to detect discrepancies between field boundaries and wind erosion obstacles due to their modelled geometrical and thematic similarities. For example, it has to be solved, how far the extracted geometric position of two different objects has to be matched, if they are located nearby each other. Similarly, extracted wind erosion obstacles without a corresponding extracted field boundary have to be checked, whether there is a field boundary, too, or whether the extraction of the wind erosion obstacle was wrong. Consequently, the combined evaluation and refined extraction process leads to a consistent and integrative final result.

3.2 Extraction of Field Boundaries

3.2.1 Segmentation of Potential Field Areas

The extraction of field boundaries begins with a segmentation in each region of interest to exploit the modelled similar characteristics and homogeneity of each field. As data source the red channel of the CIR-images is used, which according to our experience fulfils the homogeneity criterion best. To utilize the changing vegetation from one field to the next, the absolute values of the gradient are computed. The topography of the grey values is used to accomplish a watershed segmentation (SOILLE 1999). The resulting basins are marked with their corresponding mean grey value in the red channel. Potential field areas are derived grouping basins, if they lie next to each other and have a low grey value difference, additionally considering a minimum size (cf. Figure 4).

3.2.2 Deriving Missing Field Boundaries by Line Extraction and Grouping

The field areas obtained from the segmentation step are only intermediate results. The reason is, that the case of identical vegetation in neighbouring fields – and therefore a missing boundary – is not taken into account. Accordingly, a line extraction (STEGER 1998) is carried out within each field area to derive missing boundaries. The extracted short pieces of lines are grouped to straight long lines in consideration of a minimum length due to the characteristics of the field boundaries. In addition, intersection points of the lines are calculated, if the end points of the corresponding lines have a minimum distance in between. Furthermore, the lines are extended to the boundaries of the field areas, if the distance lies again below a threshold. Results of the extracted lines are depicted in Figure 4 in white. Further GIS knowledge referring to fixed field boundaries *within* the regions of interest (e.g. dead-end streets or tree rows) is introduced to support the extraction of field boundaries (cf. Figure 4). The field areas are split by the extracted or additionally introduced lines yielding the preliminary field boundaries (cf. Figure 5).

3.2.3 Using Snakes to Improve the Geometric Quality of the Results

The field boundaries are in some part geometrically inaccurate, which is why a classical snake algorithm is used to perform the precise delineation. To initialize the processing, the preliminary field boundaries are taken. Additionally, most fields are four cornered polygons and this knowledge can be exploited by using the information about the four corners as well as the straight boundaries at the sides. Snakes were originally introduced in (KASS ET AL. 1988) as a mid-level algorithm which combines geometric and/or topologic constraints with the extraction of low-level features from images. The principal idea is to define a contour with the help of mechanical properties such as elasticity and rigidity (internal energy) to initialize this contour close to the boundary of the objects. In Figure 2 an example is shown: The preliminary result of the field area is used to initialize the snake (depicted in white) and furthermore the processed different iteration steps are depicted to show the movement of the snake (black lines). The contour can be looked upon as a virtual rubber cord which can be used to detect valleys in a hilly landscape with the help of gravity. If the snake is initialized close enough to the valleys of the landscape, the gravity drags it into the valleys. The “landscape” may be a surface model, an image, or the edges of an image. The movement originates in a field of gradients, which can be computed on the base of an edge detector’s result. The *whole energy* of the snake E_{snake} , to be minimized, is the sum of the internal energy $E_{v(s, t)}$ and the external energy E_{ext} , as defined in (KASS ET AL. 1988). The internal energy is described in the following in detail due to the speciality of the here presented work, given in equation (1):

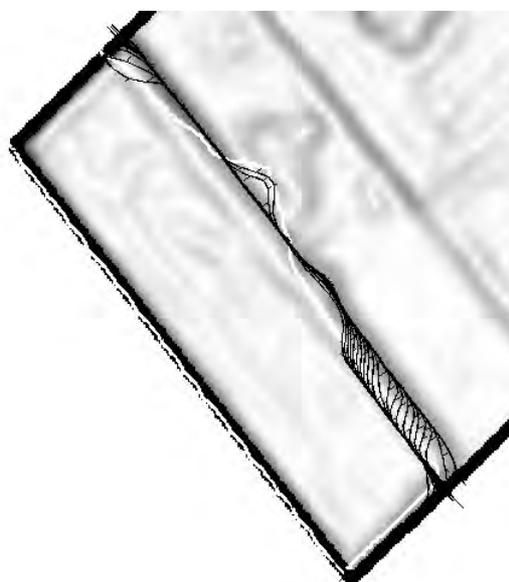


Fig. 2: Example for the measurement of the outline with a snake

$$E_{v(s,t)} = \frac{1}{2} \left(\alpha(s) \cdot |v'(s,t)|^2 + \beta(s) \cdot |v''(s,t)|^2 \right) \quad (1)$$

The application *field boundary* leads to a possibility to select special weight functions $\alpha(s)$ and $\beta(s)$, which are used to control the elasticity and rigidity of the contour $v(s,t)$; s is the arc length and t the iteration number. The weight functions have to lead to stiff edges along the expected straight lines of the field as well as to allow the snake to form corners. As *external force* the absolute values of the gradients of the given red channel of the imagery are used. Additionally, the boundaries of the region of interest and the further introduced knowledge within the region are manipulated to form “deep valleys” to steer the snake to this fixed boundaries (cf. section 2).

3.3 Extraction of Wind Erosion Obstacles

The strategy extracting wind erosion obstacles is divided into two parts, as described in section 3.1: The definition of buffers alongside GIS-objects as roads, rivers or railways allows a focussed view to narrow search areas. If high NDVI-values can be extracted within the search area, evidence of dense vegetation is given. The additional extraction of higher DSM-values than the surrounding area verifies the potential wind erosion obstacles. Objects not located alongside GIS-objects, have to be extracted without prior information about their location: In a coarse scale of the NDVI-image, a line extraction of high values is carried out as well as a line extraction of higher DSM-values than the surrounding area. In addition, the geometric model of the wind erosion obstacle has to be introduced processing the extracted short pieces to final objects in consideration of a minimum length, width and height. Another possibility to extract wind erosion obstacles is the use of texture. In addition, the extraction of single trees in a finer scale is an alternative, as for example presented in (STRAUB 2003), and a subsequent linking of the resulting objects to lines, if they are side by side.

4 Results

In this section example results are presented. In Figure 3 the red channel of the imagery of a selected region of interest is depicted, the boundaries of the regions have been derived from the ATKIS-data. The preliminary results of the segmentation are shown in Figure 4, each grey value is one segmented field area. The field areas are superimposed with extracted lines in white and additional further knowledge from the GIS-data in black. The final result of the segmentation step is depicted in Figure 5. It must be recognized, that the geometric correctness is not always satisfying: For example, the field boundaries in the middle top of the depicted region of interest in Figure 5 are not exactly identical to the real boundaries of the field in the image. The initialized snake algorithm is a reasonable possibility to refine these preliminary results, details for one field and the associated iteration steps of the snake algorithm are highlighted in Figure 2. The refined result of the extraction of field boundaries is depicted in Figure 6. The geometric correctness has improved, but the topological correctness has in some parts suffered. The realization of the proposed strategy extracting wind erosion obstacles is still in progress, which is why results in this domain are not depicted.

5 Conclusions

In this paper work on the automatic extraction of field boundaries and wind erosion obstacles from aerial imagery is presented. A semantic model integrating the different objects to be extracted and the GIS-data is described. Next, the derived strategy is discussed considering



Fig.3: Selected region of interest, depicted is the red channel of the aerial image

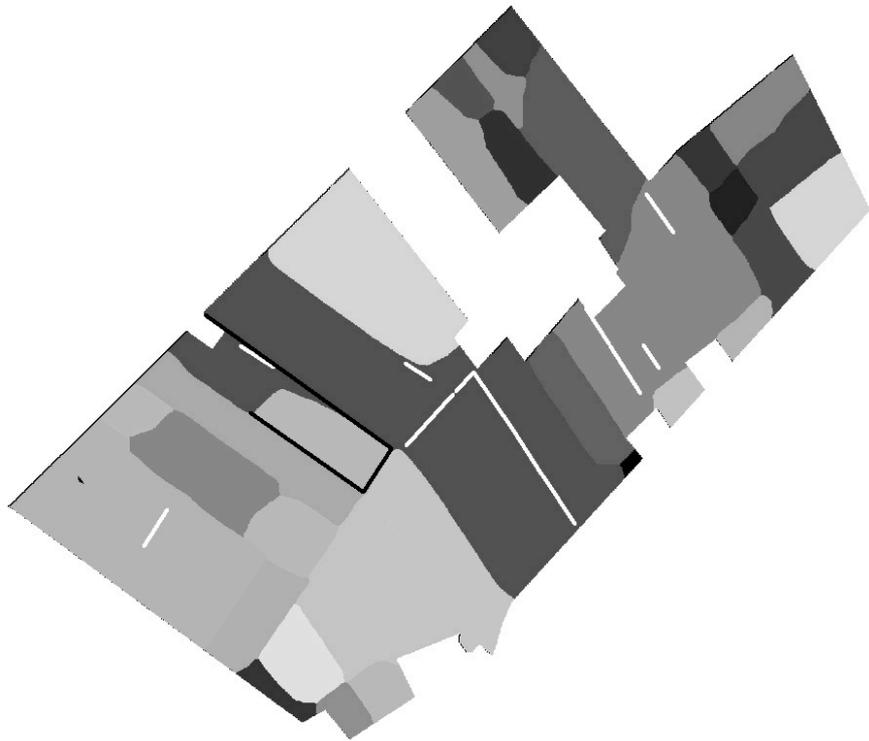


Fig. 4: Preliminary segmentation result, additionally superimposed with extracted lines (white) and further knowledge (black)

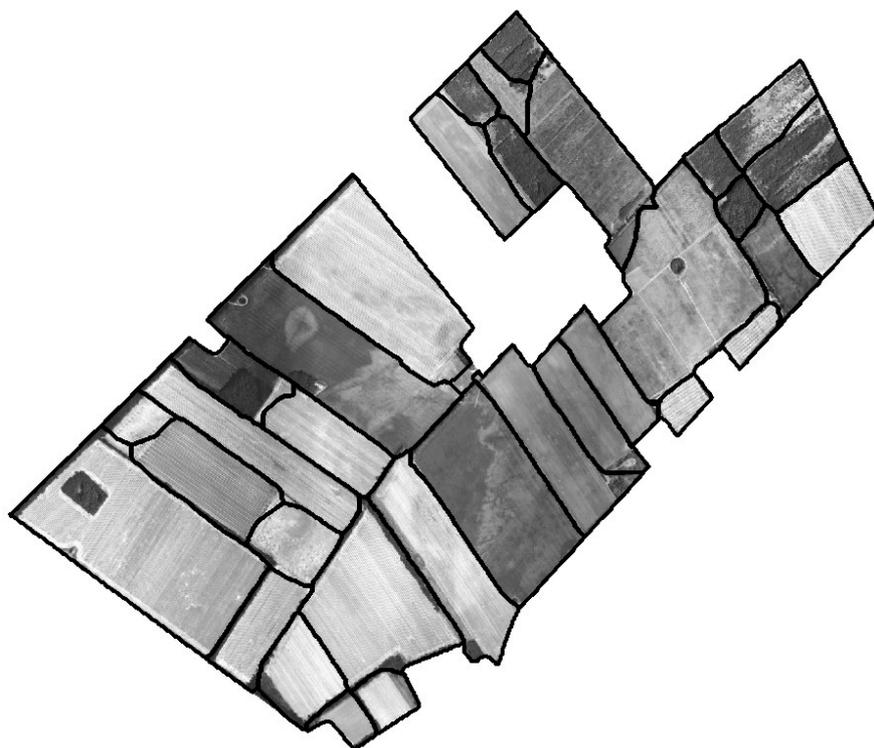


Fig. 5: Result of the preliminary field boundaries is depicted in black

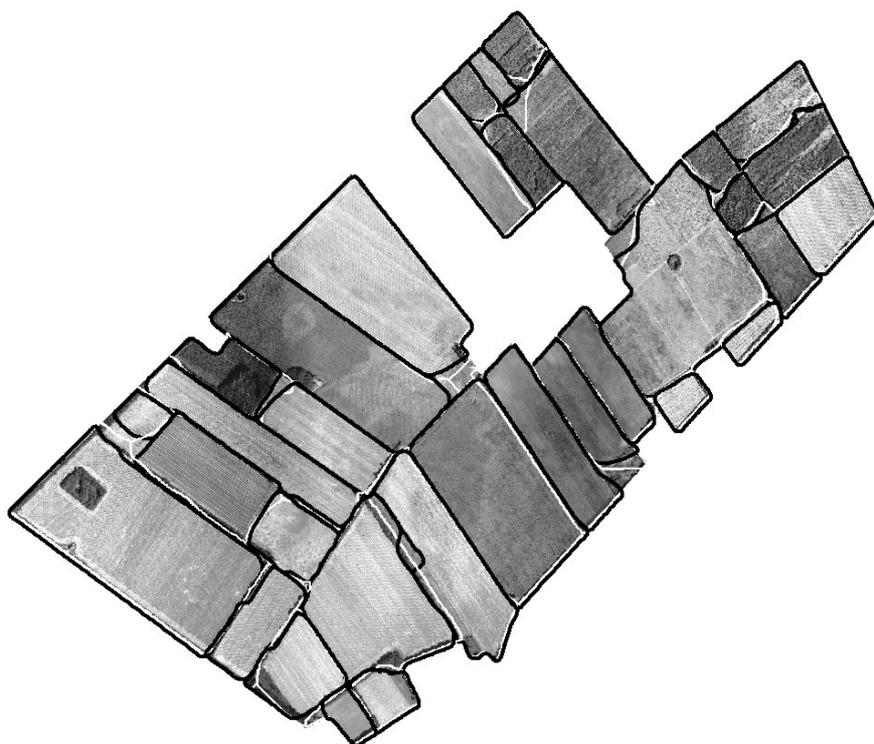


Fig. 6: Refined result of the field boundaries after the snake-processing: Initialization is depicted in white, field boundaries are depicted in black

an automatic processing flow: The strategy is divided to extract the objects of interest separately. The segmentation of field areas based on the gradients in coarse scale of the imagery is carried out using a watershed segmentation. In the future, the use of colour and/or texture may stabilize the segmentation step. Extracted and grouped lines with different criteria in a fine scale and additional introduced prior knowledge from GIS-data divide the field areas in detailed and improved preliminary results. Finally, the derived field boundaries are geometrically refined using a snake algorithm. The results demonstrate the potential of the proposed solution. Future work will be devoted to the development of an integrated network of snakes for all field areas of the region of interest together, not only a snake initialization for each field separately, in order to improve the topological correctness. The proposed strategy concerning the extraction of wind erosion obstacles has to be investigated in detail and the derived results have to be evaluated. In addition, future work will be done on the combined evaluation of the different objects deriving a refined and integrated final result.

Acknowledgements

This work is part of the programme GEOTECHNOLOGIEN funded by the Federal Ministry for Education and Research (BMBF) and the German Research Council (DFG) with the publication no. GEOTECH-75.

References

- ANDERSON, J. E., FISCHER, R. L. & DELOACH, S. R., 1999: Remote Sensing and Precision Agriculture: Ready for Harvest or Still Maturing? *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 65, No. 10, pp. 1118-1123.
- APLIN, P. & ATKINSON, P. M., 2004: Predicting Missing Field Boundaries to Increase Per-Field Classification Accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 70, No. 1, pp. 141-149.
- BALTSAVIAS, E. P., 2004: Object Extraction and Revision by Image Analysis Using Existing Geodata and Knowledge: Current Status and Steps towards Operational Systems. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 58, No. 3-4, pp. 129-151.
- BUTENUTH, M., 2004: Modelling the Extraction of Field Boundaries and Wind Erosion Obstacles from Aerial Imagery, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Istanbul (to appear).
- BUTENUTH, M., STRAUB, B. M., HEIPKE, C. & WILLRICH, F., 2003: Tree Supported Road Extraction from Aerial Images Using Global and Local Context Knowledge, In: Crowley Piater Vincze Paletta (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science*, Springer Verlag, Graz, Austria, Vol. LNCS 2626, pp. 162-171.
- HILL, D. A. & LECKIE, D. G. (Eds.), 1999: International forum: Automated interpretation of high spatial resolution digital imagery for forestry, February 10-12, 1998, Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, Victoria, British Columbia, 395 p.
- KASS, M., WITKIN, A. & TERZOPOULUS, D., 1988: Snakes: Active Contour Models. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 1, pp. 321-331.
- LÖCHERBACH, T., 1998: Fusing Raster- and Vector-Data with Applications to Land-Use Mapping, *Inaugural-Dissertation der Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn*, Bonn, 107 p.
- MAYER, H., 1998: Automatische Objektextraktion aus digitalen Luftbildern, *Habilitation Reihe C, Deutsche Geodätische Kommission, München*, No. 494.

- SOILLE, P. (Ed.), 1999: Morphological Image Analysis: Principles and Applications, Springer, Berlin Heidelberg NewYork, 316 p.
- STEGER, C., 1998: An unbiased detector of curvilinear structures, In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (Eds.), Vol. 20, No. 2, pp. 311-326.
- STRAUB, B. M., 2003: Automatische Extraktion von Bäumen aus Fernerkundungsdaten, Dissertation Reihe C, Deutsche Geodätische Kommission, München, No. 572, 99 p.
- THIERMANN, A., SBRESNY, J. & SCHÄFER, W., 2002: GIS in WEELS - Wind Erosion on Light Soils. GeoInformatics, No. 5, pp. 30-33.
- TORRE, M. & RADEVA, P., 2000: Agricultural Field Extraction from Aerial Images Using a Region Competition Algorithm, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam, Vol. XXXIII, No. B2, pp. 889-896.

Kombination von Laserscanningdaten und höchstauflösenden multispektralen Bilddaten zur Biotoptypenklassifizierung

MONIKA GÄHLER¹, JOCHEN SCHIEWE², GUIDO BOHMANN³ & RONALD JANOWSKY⁴

Dieser Artikel stellt die Ergebnisse eines Pilotprojektes zur kombinierten Nutzung von flugzeuggestützten, räumlich höchstauflösenden, multispektralen Bilddaten und Laserscanningdaten zur Biotoptypenklassifikation vor. Neben der Entwicklung von angepassten Verfahren zur Ableitung von Digitalen Oberflächen und Geländemodellen sowie Objekthöhen, als auch zusätzlicher für eine Biotoptypenklassifizierung signifikanter Merkmale aus Laserscanningdaten steht die Entwicklung von geeigneten integrativen Auswertestrategien im Vordergrund. Darüber hinaus erfolgt eine Abschätzung des Potenzials und möglicher Hemmnisse der Kombination von Laserscanningdaten und höchstauflösenden multispektralen Bilddaten.

1 Einleitung

Die Verfügbarkeit neuer flugzeuggetragener Sensoren (z.B. DMC, ADS 40, HRSC-AX, oder Ultracam-D), die Bilddaten höchster Auflösung liefern, erweitert und verändert die Arbeitsweisen zahlreicher Fachrichtungen. Zurückzuführen ist dies nicht nur auf die digitale Datenaufnahme und den damit verbundenen potenziellen digitalen Datenfluss, sondern insbesondere auf die multispektralen Eigenschaften sowie eine verbesserte radiometrische Auflösung. Darüber hinaus können zusätzlich zu den Bilddaten Digitale Oberflächenmodelle aus stereoskopischen Aufnahmen automatisiert abgeleitet werden. Eine alternative Methode zur Herstellung von Höhendaten ist der Einsatz von Laserscanning-Systemen. Auch hier existieren inzwischen Sensorsysteme, die simultane Aufnahmen von Laserscanning- und multispektralen Bilddaten erzeugen können (z.B. FALCON, ALTM/DSS oder ALS50/ADS40). Durch diese Multisensorsysteme wird das Potenzial zur Auswertung und Nutzung von Fernerkundungsdaten in einem Geoinformationssystem (GIS) weiter erhöht.

Während die Sensorik zur Erfassung der hochauflösenden, multisensoralen Daten zur Verfügung steht, fehlen aber noch geeignete Konzepte und entsprechende Auswertelgorithmen zu deren Auswertung. Aus diesem Defizit ergibt sich die Motivation für ein Pilotprojekt zur kombinierten Nutzung von flugzeuggestützten, hochauflösenden multispektralen Bilddaten und Laserscanningdaten zur Biotoptypenklassifikation, das von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) gefördert und am Forschungszentrum für Geoinformatik und Fernerkundung (FZG) der Hochschule Vechta durchgeführt wurde.

Dieses Projekt baut auf mehreren Biotoptypen-Monitoring-Vorhaben auf, in deren Rahmen Daten des digitalen Stereoscanners HRSC-A bzw. der neueren Kameraversion HRSC-AX (NEUKUM ET AL., 2001) genutzt wurden. Ziel der Projekte ist die hochgenaue Erfassung und das langfristige Monitoring von Biotoptypen und ihren Veränderungen in den Uferandbereichen mehrerer großer deutscher Flüsse infolge von Ausbaumaßnahmen. Hierfür konnte ein hierarchisches Klassifikationsverfahren entwickelt werden, das eine indexbasierte Segmentie-

¹ Dipl.-Geogr. Monika Gähler, Forschungszentrum für Geoinformatik und Fernerkundung (FZG), Hochschule Vechta, Postfach 1553, 49364 Vechta, e-mail: mgaehler@fzg.uni-vechta.de

² Dr.-Ing. habil. Jochen Schiewe, FZG, Hochschule Vechta, e-mail: jschiewe@fzg.uni-vechta.de

³ Dipl.-Umweltwiss. Guido Bohmann, FZG, Hochschule Vechta, e-mail: gbohmann@fzg.uni-vechta.de

⁴ Dipl.-Biol. Ronald Janowsky, FZG, Hochschule Vechta, e-mail: rjanowsky@fzg.uni-vechta.de

rung und Vorklassifikation sowie eine GIS-basierte Postklassifikation beinhaltet und zu großen Teilen in automatisierte Abläufe überführt werden konnte (EHLERS ET AL. 2003, GÄHLER & JANOWSKY, 2003, GÄHLER ET AL., 2001). Beim bisherigen Verfahren wurden sowohl die multispektralen HRSC-A(X)-Bild- als auch die aus einem Stereo-Matching abgeleiteten Höhendaten dieses Sensors. Die letztgenannten erwiesen sich für die Extraktion einiger Objektklassen als nur eingeschränkt verwendbar. Im Rahmen des Pilotprojektes wurden daher die folgenden übergeordneten Ziele verfolgt, deren Erreichung in den weiteren Abschnitten betrachtet werden soll:

- Bewertung der vorab nach Oberflächentyp klassifizierten Laserscanning-Höhendaten im Hinblick auf die Klassifizierung;
- Entwicklung von angepassten Verfahren (z.B. Interpolation) zur Ableitung von Digitalen Oberflächen- und Geländemodellen sowie von Objekthöhen;
- Bestimmung zusätzlicher aus den Laserscanning-Höhendaten abgeleiteter Merkmale sowie die Analyse ihrer Signifikanz für die Biotoptypenklassifizierung;
- Untersuchung des Mehrwerts von Laserintensitätsdaten im Ablauf der Biotoptypenklassifizierung;
- Abschätzung des Potenzials und möglicher Hemmnisse der Kombination von Laserscanningdaten und höchstauflösenden multispektralen Bild- als auch Höhendaten;
- Beurteilung des Verhältnisses von Mehraufwand und Mehrwert.

2 Datengrundlage

Im Rahmen des Pilotprojektes zur kombinierten Datenauswertung wurde ein Ausschnitt von etwa 65 km² aus früheren Untersuchungsgebieten - das Areal um das so genannte „Mühlenberger Loch“ bei Hamburg - ausgewählt, zu dem bereits HRSC-AX-Bild- und Höhendaten vom 29. Juli 2002 vorlagen (Abb. 1, oben).

Zusätzlich wurden nun nahezu gleichzeitig (d.h. 14 Tage früher) aufgezeichnete Höhen- und Intensitäts-Daten des Laserscanning-Systems ALTM 1225 (Fa. Optech) in den Auswerteprozess aufgenommen (Abb. 1, unten). Dieser Sensor erfasst First- und Last-Echo-Höhendaten sowie Intensitätswerte bei einer Messrate von 25 kHz, einer Scanfrequenz von 25 Hz sowie einem Scanwinkel von 20°. Bei der Aufnahme wurden 10 überlappende Streifen bei einer Flughöhe von 1200 m aufgenommen, sodass eine durchschnittliche Punktdichte von 1 Punkt/m² erzielt werden konnte. Seitens des Datenlieferanten erfolgte sowohl die Georeferenzierung der Daten, als auch die thematische Klassifizierung (u.a. in die Klassen „Grund mit Wasserflächen“, „Oberflächen“ und „Sonstige Punkte – insbesondere Vegetation“) durch Verwendung spezieller Filteralgorithmen.

3 Datenvorverarbeitung

3.1 Höhendaten

Die originären Höhendaten liegen als unregelmäßig verteilte Punktwolke vor. Für den Klassifizierungs-Algorithmus ist eine Rasterisierung notwendig. Um die originären Höhen beizubehalten und keine Verfälschung durch Interpolationen zu bewirken, wurde ein hochaufgelöstes Raster mit einer Rasterweite von 0.25 m gewählt.

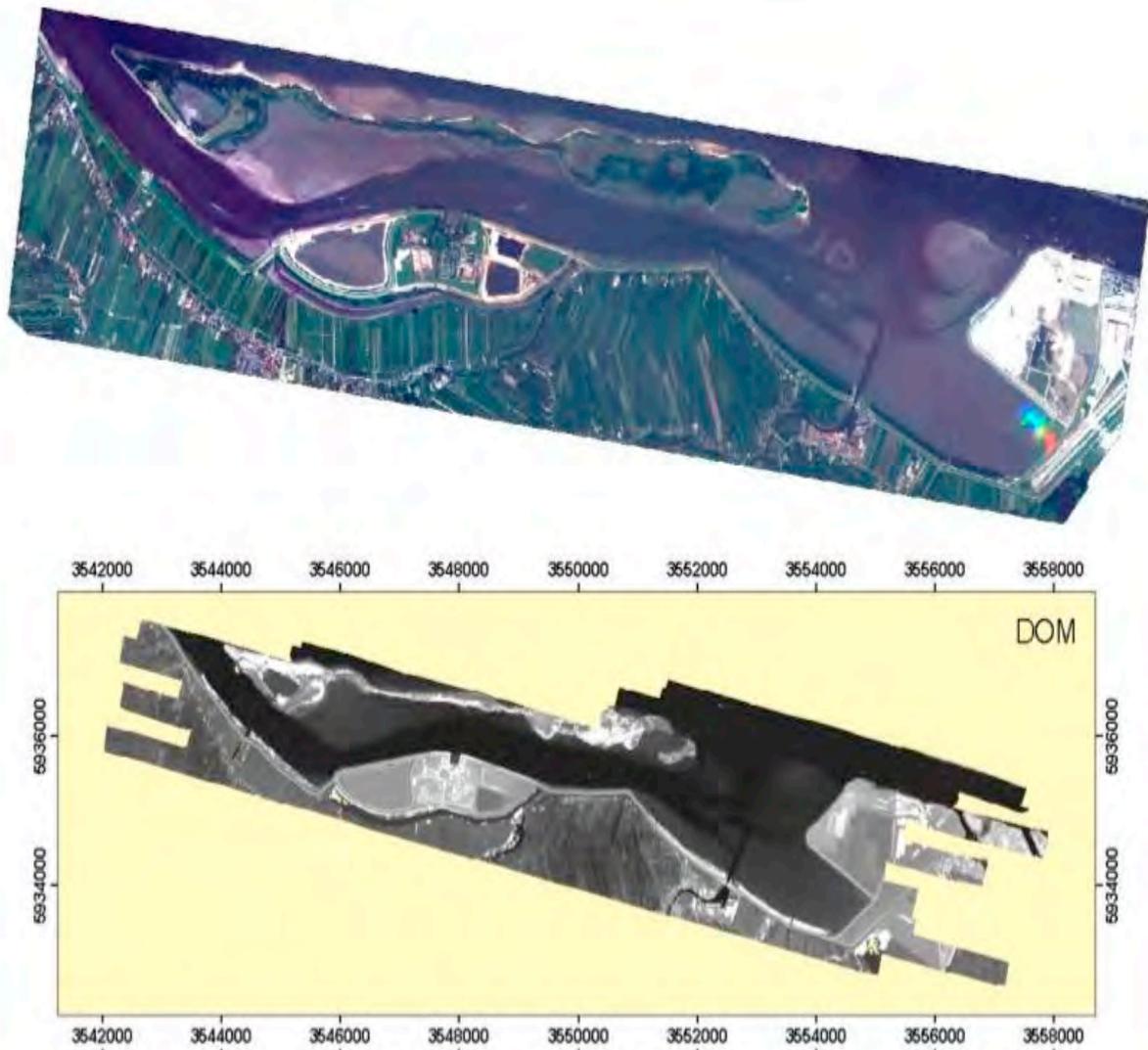


Abb. 1: Untersuchungsgebiet „Mühlenberger Loch“ HRSC-AX-Bilddaten (RGB-Darstellung; oben) und ALTM-Laserscanning-Höhen (Digitales Oberflächenmodell; unten)

Zur Reduktion des Speicher- und Prozessierungsaufwandes wurden für die weiteren Auswertungen nur 340 m breite Korridore um die jeweiligen Streifenmitten berücksichtigt, so dass diese noch zu ca. 20 m mit den benachbarten Streifen überlappen. Das resultierende Höhenmodell besteht danach nur noch aus ca. 10 Mio. Punkten. Ferner verringert sich der maximale Off-Nadir-Blickwinkel auf 8° , sodass Abschattungseffekte reduziert werden. Um grob falsche Höhenwerte (Ausreißer) zu detektieren, wurde ein allgemeiner Wertebereich für das gesamte Untersuchungsgebiet definiert, in dem alle Höhen liegen müssen (hier: -5 m ... +80 m). Bei der visuellen Qualitätskontrolle der thematisch klassifizierten Höhendatensätze (siehe Abschnitt 2) wurden einige Fehlklassifikationen sowie Lücken erkannt.

Zur Ableitung des Digitalen Oberflächenmodells (DOM), d.h. der Menge von Punkten, die die jeweils größten Höhenwerte über einer Position darstellen, müssen die Bereiche, für die keine Höhenwerte vorliegen, durch eine Interpolation geschlossen werden. Hierbei werden vorhandene Höhenpunkte unverändert übernommen und ansonsten die Lückenbereiche durch eine 3x3-Maximum-Filterung des vorklassifizierten Oberflächen-Datensatzes („TOP“) kontinuierlich und iterativ von außen nach innen geschlossen.

Das Digitale Geländemodell (DGM) beschreibt die jeweils tiefsten Höhenwerte an einer Position. Gegeben sind die vorklassifizierten Bodenpunkt-Höhen („GRD“-)Daten, die ein ausmaskiertes DGM darstellen. Man erhält ein geschätztes DGM, indem alle Lücken, die entweder durch die Ausmaskierung von Gebäude- oder Vegetations-Höhenpunkten, oder aber durch fehlende Aufnahmen entstanden sind, durch eine wiederholte 3x3-Minimum-Filterung aufgefüllt werden (unter Beibehaltung vorhandener Werte).

Die Differenz zwischen DOM und geschätztem DGM ergibt nun die Höhe von Objekten auf der Geländeoberfläche (normalisiertes DOM – siehe Abb. 2). Ein Vergleich dieses Modells mit dem nDOM, das aus der Differenzbildung zwischen dem vorhandenen HRSC-AX-DOM und dem DGM5 der Landesvermessung entstanden ist, verdeutlicht, dass zum einen die Zuverlässigkeit der Laserpunkte höher ist, zum anderen die Delineation bzw. die Kanten von höher stehenden Objekten (insbesondere Gebäuden) sowie von komplexen Strukturen signifikant besser gelingt.

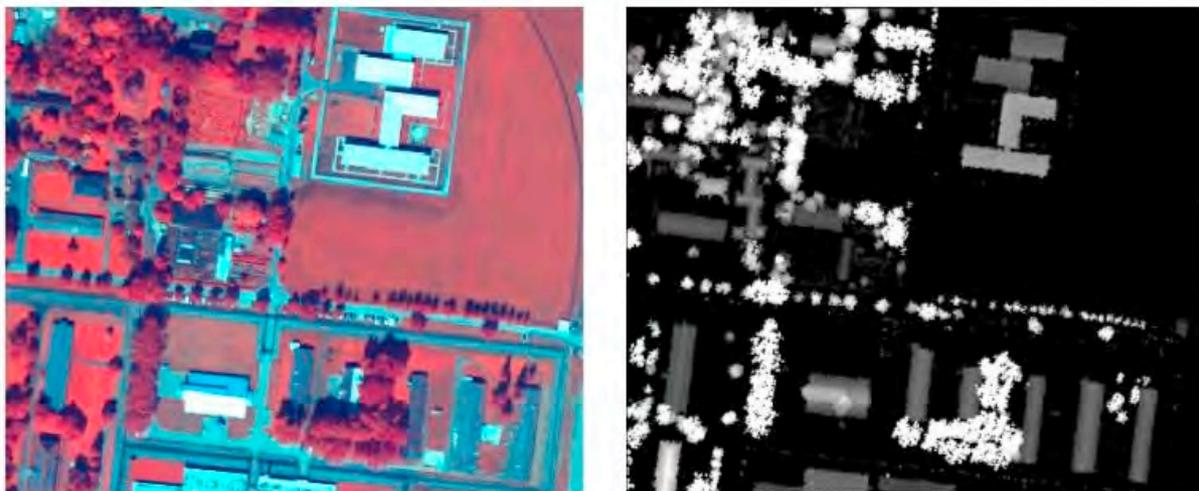


Abb. 2: Bildausschnitt RGB (links) und aus Laserscanningdaten abgeleitetes nDOM (rechts)

3.2 Intensitätsdaten

Analog zu den Höhendaten weisen auch die mit einer radiometrischen Auflösung von 8 bit aufgezeichneten Intensitätswerte des Laserscanning-Systems lückenhafte Bereiche auf, die durch eine Interpolation mittels einer 21x21-Mittelwert-Filterung ohne Resampling-Verluste in ein Raster mit der Gitterweite 0.25 m überführt wurden. Die große Filtergröße bewirkt die notwendige Bildglättung.

Eine visuelle Qualitätskontrolle ergab eine auffällige Streifung des Bildes, die sich besonders entlang der Streifenmitten sowie über Wasserregionen, nicht aber über den Landregionen zeigte. Ein Grund für diesen Effekt ist die Tatsache, dass eine Entfernungskorrektur nicht angebracht wurde. Aufgrund der ungenauen Kenntnis über die Vorverarbeitung sowie das irreguläre Auftreten dieses Effektes wurde keine weitere Korrektur angebracht.

4 Ableitung und Selektion von Merkmalen aus Laserdaten

Aus den Höhen- und Intensitätsdaten können neben den absoluten Werten zusätzliche Merkmale wie z.B. Gradienten, Krümmungen, Texturen und Aspekte zur Informationsgewinnung abgeleitet werden. Vor dem Hintergrund einer Biotoptypenklassifikation wurde die Objekt-

klassen-spezifische Signifikanz aller Merkmale abgeschätzt und interpretiert. Die Spezifizierung relevanter Szenenmerkmale erfolgte hierbei einerseits durch eine visuelle Interpretation, andererseits durch die Bestimmung und Bewertung von statistischen Kennwerten (Lage- und Streuungsparameter), die objektweise abgeleitet wurden.

4.1 Höhenmerkmale

Abgeleitete Höhenmerkmale sind erwartungsgemäß für "hohe" Biotoptypen sinnvoll einsetzbar. Insbesondere das nDOM, das die absoluten Objekthöhen beinhaltet, kann eine sehr genaue Unterscheidung von Biotoptypen für eine Klassifikation leisten. Die abgeleiteten Höhentexturen (3x3-Edge Detektion mit anschließender 3x3-Varianzfilterung) bieten ebenfalls für bestimmte Objekttypen eindeutige Merkmale wie z.B. zur Unterscheidung von Gebäuden (z.B. Flachdach und Giebedach), aber auch für komplexe Strukturen (z.B. Obstplantagen), sodass diese im weiteren Klassifikationsverlauf eingebunden wurden. Darüber hinaus bietet eine Kombination der Höhenmerkmale mit spektralen Informationen bzw. das Verhältnis der Höhenmerkmale zueinander eine weitere Option zur Klassifikation.

Weitere kantenbasierte Operatoren (z.B. Sobel- und LoG-Filterungen) konnten eine recht genaue Delineation der Gebäude und Bäume bzw. Baumgruppen bewirken. Allerdings muss festgehalten werden, dass die Kantenoperatoren für die folgenden Auswertungen nur einen geringen Mehrwert bedeuten, da sich zum einen gegenüber den statistischen Kennwerten sowie den absoluten nDOM-Werten keine signifikante Verbesserung bei der Identifikation von einzelnen Objektklassen ergibt. Zum anderen zeichnet sich der bisher entwickelte Klassifizierungsalgorithmus durch ein pixel- bzw. flächenhaftes Vorgehen aus, eine methodische Integration erschien daher zu aufwändig.

4.2 Intensitätsmerkmale

Auch die Laserintensitätsdaten wurden zur Abschätzung des Potenzials für die nachfolgende Klassifizierung eingehend untersucht. Die dabei erzielten Resultate können jedoch nur als sehr eingeschränkt als Unterstützung für die Klassifikation beurteilt werden. Zurückzuführen ist dies insbesondere auf die relativ geringe radiometrische Auflösung der Ausgangsdaten, den hohen Rauschanteil sowie die labilen Erfassungs- und Korrekturverhältnisse (s. Abschnitt 3.2). Auf die Einbindung der Intensitätsdaten wurde daher verzichtet.

5 Integration der Merkmale in den Klassifikationsalgorithmus und Vergleich der Klassifizierungsergebnisse

Für eine detaillierte Darstellung und Beschreibung des auf Grundlage von HRSC-AX-Daten entwickelten Klassifikationsalgorithmus wird auf EHLERS ET AL. (2003) verwiesen. Die Einbindung der zusätzlichen Höhenmerkmale erfolgte nach einer Erprobung unterschiedlicher Varianten in folgender Vorgehensweise: In einem ersten Schritt wurde der schon vorliegende Datenbestand, der aus den Kanälen Blau, Grün, Rot, Nahes Infrarot, Pan, DOM, NDVI, Textur besteht (vgl. EHLERS ET AL., 2003), um das nDOM und die Höhentexturen ergänzt. Durch die Kombination der Merkmale der absoluten Objekthöhe, des NDVI, der Höhentextur sowie einer Mindestflächengröße (40 m²) konnte eine genaue Detektion von hohen Vegetationsbeständen, sonstigen hohen Objekten (z.B. Gebäude), niedriger Vegetation, offener Boden sowie Wasserbereichen erzielt werden (siehe Abb. 3 und Abb. 4). Insbesondere die hohen Objekte mit „scharfen Kanten“ wie z.B. Häuser oder andere anthropogene Elemente

können hierbei deutlich besser automatisiert identifiziert werden als in früheren Klassifikationen, die die stereoskopischen Höhendaten des HRSC-AX-Sensors verwendeten.

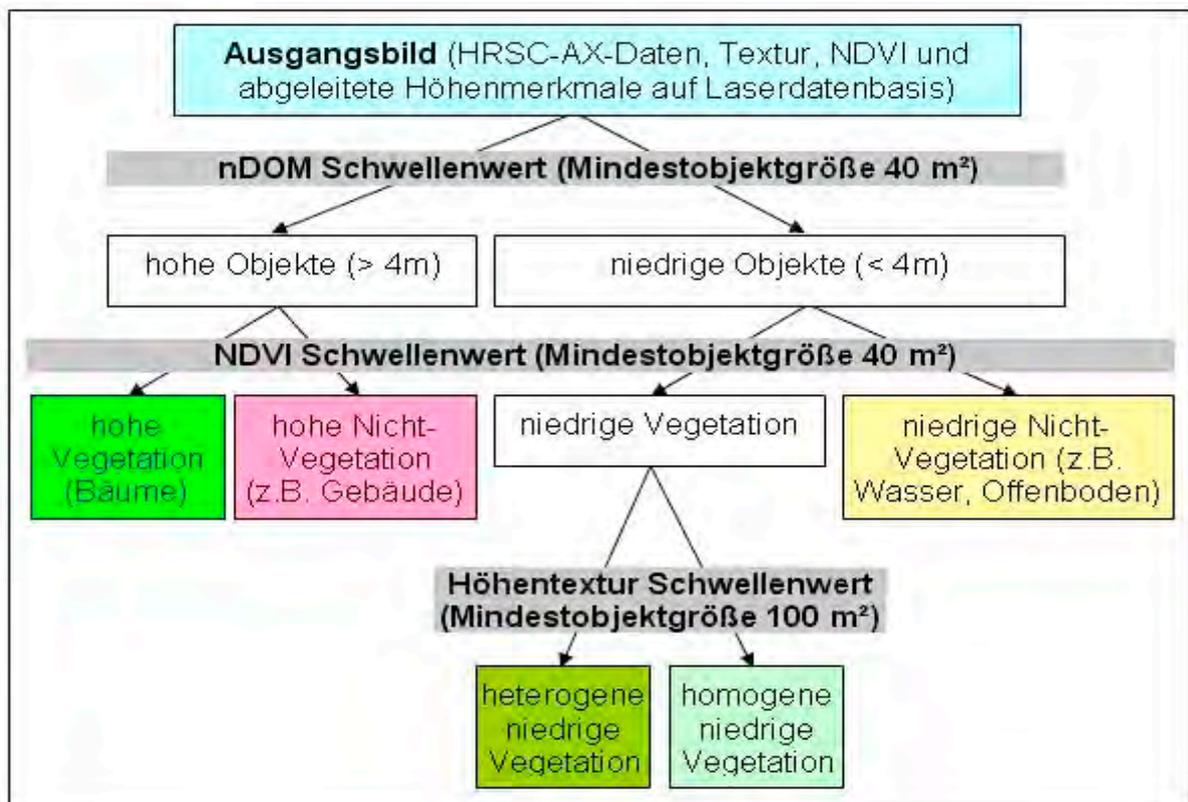


Abb. 3: Schema der Trennung von semantischen Informationen

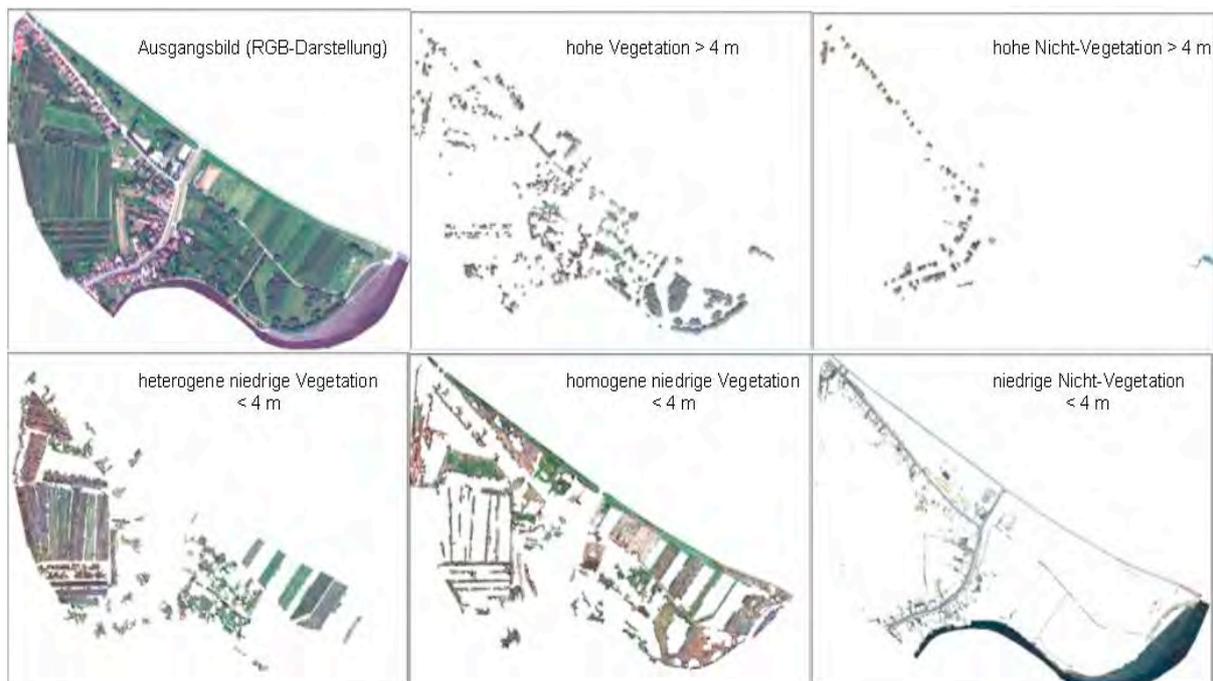


Abb. 4: Trennung von semantischen Informationen anhand des Beispiels "Este-Mündung"

Die weitere Unterscheidung der Objektklassen wurde wie im bestehenden Klassifikationsalgorithmus durch unüberwachte und überwachte Klassifikation und eine anschließende GIS-basierte Postklassifikation, die sich aus der regelbasierten Überlagerung der Klassifikationsergebnisse, der Definition von Mindestflächen und dem Eliminieren der Schattenbereiche unter Einbeziehung von Höheninformationen zusammensetzt, vorgenommen.

Ein quantitativer Vergleich des Ergebnisses auf Grundlage des kombinierten Datensatzes mit den vorhandenen Referenzdaten liegt zu diesem Zeitpunkt noch nicht vor.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Während die Erfassung von hochaufgelösten, multisensoralen Daten technisch weit fortgeschritten ist, fehlen noch geeignete Konzepte und entsprechende Algorithmen zu deren Auswertung. In diesem Zusammenhang wurde ein Pilotprojekt zur kombinierten Nutzung von flugzeuggestützten, hochaufgelösten multispektralen Bilddaten und Laserscanningdaten zur Biotoptypenklassifikation durchgeführt.

Hierbei konnte festgestellt werden, dass eine Ableitung von Merkmalen aus Laserscanningdaten sowie die Integration in entwickelte Auswertelgorithmen einen Mehrwert für Klassifikationen darstellen kann. Der Vorteil ist vor allem in urbanen Bereichen bzw. stark anthropogen überformten Gebieten mit scharfen Objektkanten zu erkennen. Für die Abgrenzung von natürlichen und naturnahen Strukturen und Objekten (wie z.B. Bäumen) ist ebenfalls ein Mehrwert für die Unterscheidung der verschiedenen Objekttypen zu ermitteln. Dieser muss bei gleichzeitiger Betrachtung des höheren Zeit- sowie insbesondere des Kostenfaktors jedoch als verhältnismäßig gering eingeschätzt werden. Allerdings ist vor dem Hintergrund, dass das vorliegende Untersuchungsgebiet ein flaches Relief aufweist und ein DOM somit hier nahezu Objekthöhen widerspiegelt, der Zugewinn an Information bzw. Detailschärfe in Gebieten mit mehr Reliefenergie als deutlich höher einzuschätzen. Intensitätswerte bzw. -merkmale hingegen konnten bei der vorliegenden Datenbasis keine Unterstützung zur weiteren Unterscheidung von Biotoptypen leisten. Für das Szenario, dass keine weiteren Multispektraldaten vorliegen sollten, könnten die Intensitätswerte aber sicherlich eine Unterstützung bei der visuellen, eventuell auch der automatisierten Auswertung bieten.

7 Danksagung

Die hier vorgestellten Ergebnisse basieren auf einem Pilotprojekt, das von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) gefördert wurde.

8 Literatur

- EHLERS, M., GÄHLER, M. & JANOWSKY, R. 2003: Automated Analysis of Ultra High Resolution Remote Sensing Data for Biotope Type Mapping: New Possibilities and Challenges. - In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 57, S. 315-326.
- GÄHLER, M. & JANOWSKY, R., 2003: Hierarchisches Klassifikationsverfahren zur automatisierten Ableitung von Biotoptypen aus HRSC-AX-Scannerdaten. Publikationen der DGPF (Jahrestagung Bochum, 2003), 12, S. 81-88.
- GÄHLER, M., JANOWSKY, R. & SCHRÖDER, R., 2001: Automatisierte Biotoptypenklassifizierung auf Basis höchstauflösender Flugzeugscannerdaten. In: Blaschke, T. (Hrsg.):

Fernerkundung und GIS. Neue Sensoren – innovative Methoden, Heidelberg, S. 233-242.

NEUKUM, G., & HRSC-TEAM, 2001: The Airborne HRSC-AX cameras: evaluation of the technical concept and presentation of application results after one year of operation. In: Fritsch, D. & R. Spiller (Hrsg.): Photogrammetric Week 2001, Heidelberg, S. 117-130.

Quality Assessment of Road Databases Using Aerial Imagery¹

MARKUS GERKE²

Summary: Digital road databases are widely used in many facets of our daily life. Most of these databases come with a nominal quality indication, but often more detailed quality descriptions regarding possible errors, the positional accuracy, and information on the completeness of the vector data are desirable. In this paper an approach for the quality description of road data from the Authoritative Topographic Cartographic Information System (ATKIS) of Germany is introduced. The work is embedded in a project initiated by the German Federal Agency for Cartography and Geodesy (BKG), which is interested in an automation of the road data verification process. How existing road vectors from ATKIS can be assessed by combining the information coming from several object extraction algorithms is investigated. These objects are modeled in the so called relationship model where the topologic and geometric relation between roads and other objects are given. For example a row of trees is often parallel to roads and has a minimum and a maximum distance from the carriageway. Every extracted object - such as rows of trees extracted from aerial imagery - may then support a given ATKIS road. If it does not coincide with the model it gives evidence against the ATKIS road. The Hint-Theory is used which is derived from the Dempster-Shafer Theory of evidence to combine all information related to an ATKIS road segment. Example results show that the introduced procedure is able to yield reliable information on the quality of ATKIS objects.

1 Introduction

Nowadays, large scale road vector data is available in many countries as part of the national geo-spatial core data. Questions are starting to arise from the user's side: is the data accurate enough for a particular application, is it up-to-date and are the attributes correct? In this paper a method for an automatic quality assessment for given road vector data using information automatically extracted from digital aerial images is developed. Quality comprises completeness, positional accuracy, attribute correctness and temporal correctness for each object. The presented method is not designed to check the completeness as only objects contained in the database are considered (verification of existing data). However, a potential extension regarding the detection of new roads will be sketched in the outlook. In (GERKE et al. 2004) road objects from the Authoritative Topographic Cartographic Information System (ATKIS) of Germany are verified using automatic road extraction algorithms. The road extraction algorithm used in that work exploits knowledge on the appearance of roads in aerial or satellite imagery, but does not consider so called local context objects. These objects (such as rows of trees) may hamper the extraction of roads, as these may not be directly visible due to occlusion. The explicit modeling of the topologic and geometric relation which do exist in reality between such context objects and road objects helps to interpret gaps in road extraction and thus supports road extraction, e.g. see (HINZ & BAUMGARTNER 2000) and (HINZ 2003).

In this work the topologic and geometric relations between local context objects, extracted roads and ATKIS road objects are modeled in a so called relationship model. The goal is to

¹ This paper is a slightly modified version of (GERKE 2004).

² Markus Gerke, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover, Nienburger Str. 1, 30167 Hannover, e-mail: gerke@ipi.uni-hannover.de

assess given ATKIS objects by means of extracted objects (either local context objects or road objects). Every extracted object gives a certain portion of evidence regarding the hypothesis that a certain object from the ATKIS database maintains the modeled relations. In order to balance the given evidences the Hint-Theory being an approach to the Dempster-Shafer-Theory is applied.

2 The Hint-Theory: An Approach to Evidence-Theory

The background of the Evidence-Theory (E-T) is the assessment of incomplete knowledge by means of degrees of belief (lower probability) and degrees of plausibility (upper probability). The roots of E-T can be found in (DEMPSTER 1967), whereas the actual origin of E-T is known to be set by Shafer in his monograph (SHAFER 1976). The degree of belief (often called credibility) expresses to what extent information can be trusted. The degree of plausibility specifies to what extent there is no disagreement regarding an information. Further information regarding E-T can be found in (SHAFER & PEARL 1990), an introduction to the Dempster-Shafer-Theory is given in (GORDON & SHORTLIFFE 1990).

The Hint-Theory (H-T) is an approach to the E-T, its fundamentals can be found in (KOHLAS & MONNEY 1995). The measure to what extent a hypothesis is proved by the Hint H is called support (degree of certitude). The extent to what there is no disagreement to a hypothesis is called plausibility. The interpretations of support and plausibility are very close to Dempster's theory of upper and lower probability. Hints are combined applying Dempster's Rule.

In (KOHLAS & MONNEY 1995) it is shown that the Bayesian approach can be represented by E-T, whereas a representation of E-T by Bayes Theory is not feasible. One interesting difference to the Bayesian approach is the possibility to formulate ignorance: in the Bayesian framework the evidence must be allocated completely to the possible hypotheses, thus a priori probabilities are selected in order to calculate conditional probabilities from found evidence. In E-T it is allowed to explicitly formulate ignorance and therefore a specification of a priori knowledge is not required.

In this work the Hint-Theory is preferred to a Bayesian approach because assumptions about a priori probability distributions concerning the quality of an individual ATKIS object can not be made. One could take into account to obtain this information from experience but this could lead to a distortion of results. The main reason for this is that the influences to the data quality of ATKIS are manifold and can not be modeled a priori.

3 Relationship Model

The assessment of ATKIS objects by means of extracted objects or by means of objects of a higher quality requires a model describing the properties of all involved object classes and their relations. The model used here has two major properties: a) the attributes and the attributive and positional certainties can be assigned in an uniform manner and b) a separation between objects to be assessed, objects which directly give evidence and context objects is given. These properties are important because a) assures that the model is extensible with new object classes and b) allows to apply this approach even without having information about context objects. The relationship model (ref. to Fig. 1) contains three major classes: ATKIS objects, context objects and extracted road objects. Additionally the topologic and geometric relations are described. Such models are called relationship models, because the main intention is to illustrate the relations between the objects of interest. It can also be understood as an extension to so called local context models as introduced in (MAYER 1998).

The main extension consists in the insertion of the GIS objects which have to be assessed. Moreover the geometric subelements of a line object (segments) are explicitly contained.

Objects are geometrically described by a concatenation of segments consisting of two points (thus resulting in a line-string). The decision to choose this representation (e.g. in contrast to a polynomial one) is based mainly on computational considerations. If necessary the conversion from any representation to a line-string representation is done by a quantization (accepting a certain amount of loss of accuracy). In the assessment phase each segment of an object is analysed separately. By means of combining the assessment results of all object's segments it is possible to obtain an assessment result for the whole object. The relationship model is independent of global context, i.e. the appearance of objects in different environments. This knowledge must be considered by the respective object extraction algorithm.

3.1 Object Classes

Three groups of attributes for the specification of the quality are used (refer to Fig. 1):

1. *certainty* Δ : The certainty represents the range in which a variable is defined. *Certainty* can be understood as an equipartition. For example if an attribute *width* is 5m and the certainty of this value is 2m than it is assumed that $width=[3...7m]$.
2. *precision* σ : The precision is a measure in the sense of a standard deviation (Gaussian). If in the above example the *precision* is 2m then the probability that $width=[1...9m]$ would be about 95% (2σ).
3. *confidence* p_{con} : Many object extraction algorithms apply an internal evaluation of the results. This measure should be used in the assessment phase and is therefore also part of the attributes. The confidence is defined in $[0,1]$.

3.1.1 Linear Local Context Object

In order to fulfill the requirement of a general framework for describing context objects a generic class *Linear Local Context Object* has been defined. All local context objects are defined based on a common model; they just differ in the relation to the ATKIS object. The attributive description for any object defined in *Linear Local Context Object* is explained in the following:

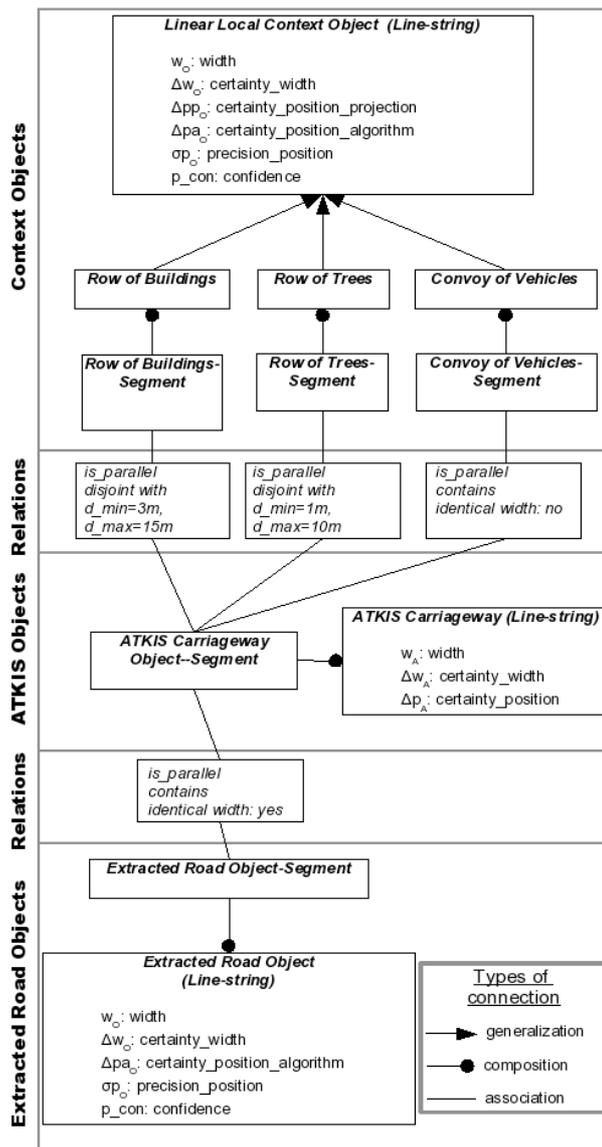


Figure 1: Relationship Model

- *width* w_O and *certainty_width* Δ_{wO} : The local context objects are represented by means of the center axis. In order to be able to describe and assess topologic relations knowledge about the width and its certainty is necessary.
- *certainty_position_projection* Δ_{ppO} : In this value the certainty regarding the position inherited by ortho-projection is considered: normally orthoimages are used which have been rectified using a terrain model, not considering objects above the ground (like trees and buildings). This leads to a position offset of those objects in the orthoimage, which has to be taken into account when topologic relations are assessed. The precise value of this offset is mostly unknown due to missing height information, but a range can be specified.
- *certainty_position_algorithm* Δ_{paO} : This value is similar to the previous attribute, but it emanates from the algorithm extracting the object (or more general: from the source of information): Often it is unclear how to fix the position of an object. For example the object *Row of Trees* is situated beside the road, i.e. the stems stand outside the carriageway. But in an aerial imagery one can just observe the crowns and is therefore just able to make assumptions about the position of the stem. This assumption needs to be reflected in *certainty_position_algorithm*.
- *precision_position* and *confidence*: Refer to the general description of the quality attributes. In practice these measures are obtained for every algorithm individually, for example incorporating the pixel size and sub pixel accuracy for *precision_position*. The *confidence* is obtained by applying an interior assessment of the results.

One could also consider defining a Gaussian distribution for some measures defined as *certainty* above. If such a representation suits the requirements better has to be investigated in the future.

3.1.2 ATKIS Carriageway Object

Regarding the ATKIS objects the carriageway object is considered. In ATKIS the carriageway is implicitly contained in roads and in objects of higher complexity such as highways. It can be easily derived from the standardized ATKIS road classes. The geometric description of carriageways in ATKIS consists of the center axis and the width, given as attribute (assuming a constant width). The width w_A of an ATKIS object, its certainty Δ_{wA} as well as the nominal certainty of the position (Δ_{pA})³ are given in the attributes of the base class *ATKIS Carriageway Object*.

3.1.3 Extracted Road Object

In the relationship model a general class for extracted road objects is also present: *Extracted Road Object*. Its attributes are similar to the ones defined for the *Linear Local Context Object*, except for *certainty_position_projection*, this certainty is normally not of interest for roads as they are situated on the ground⁴.

3.2 Relations

In the relationship model the geometric and topologic relations between an ATKIS object and the local context objects as well as the extracted road objects are also given. It is important to

³ Normally this value is $\Delta_{pA}=3m$.

⁴ Special cases such as road bridges not being present in the height model are for the moment not of interest.

note that the given relations are independent of any quality values: it is a general description of the reality.

The geometric relation *is_parallel* expresses the fact that in reality context objects are often parallel to road objects: For example in open landscapes elongated rows or trees are situated parallel to roads; in settlement areas the same holds for building rows.

The topologic relation is important for this work as it must be taken into account that for example rows of trees must be situated outside the carriageway given in ATKIS whereas an extracted road (the surface of the road) must be contained in the ATKIS carriageway and the width of both objects must be identical. The topologic relations considered so far are *disjoint* and *contains*. The latter one is defined relative to the ATKIS object. Besides this qualitative topologic relation one may define side conditions. For *disjoint* it is often desirable to give a minimum and a maximum distance (d_{min} , d_{max}), which defines on the one hand an empty space between the road and the respective context object (d_{min}) and on the other side some sort of influence border (d_{max}). For example a row of trees must have a minimum distance to the carriageway (due to security reasons) and also it is expected that trees having a distance to the carriageway larger than a certain value have no relation to the road.

The topologic relation *contains* is for objects being situated on the carriageway. The possible side condition for this relation is the indication that the width of both objects needs to be identical. This is important for extracted road objects. In Fig. 1 some object classes are derived from *Linear Local Context Object*, but an extension to other objects is possible thanks to the common framework. The given side conditions for the topologic relations are chosen from experience, but the incorporation of prior knowledge from road planning instructions is also possible.

4 Strategy for ATKIS road assessment and implementation

In the framework of road assessment it is sufficient to define a region of interest (ROI) for each *ATKIS Carriageway Object-Segment* including all extracted objects and to assess the given segment using these objects. The size of the ROI depends on the modeled relations as well as on the given quality measures: the worse the extracted data, the larger the ROI. As will be shown later the degree of support an extracted object gives for the assessment also depends on its quality. The strategy for road assessment is as follows:

1. Extraction of *Linear Local Context Objects* and assignment to *ATKIS Carriageway Object-Segments* (depending on the quality of extracted *Linear Local Context Objects* and its modeled topologic relation to ATKIS).
2. Definition of ROI for each *ATKIS Carriageway Object-Segment*, depending on the assumed quality of *Extracted Road Objects*. Subsequent extraction of road objects in the ROI.
3. Assessment of the ATKIS segment using Hint-Theory: To what degree do the extracted objects support the existence/nonexistence of the ATKIS segment? The given certainties and precisions assigned to the objects are considered and are reflected in the degree of support.
4. Linkage of the assessment results of all segments from one ATKIS object in order to achieve an object-wise assessment.

The sequence concerning the assignment of *Extracted Road Objects* to the ATKIS segment (step 2) depends on the road extraction strategy. If the road extraction algorithm uses input information from ATKIS (as done e.g. in (GERKE et al. 2004)) the definition of a ROI before road extraction is reasonable, whereas if it does not use such information the road extraction is independant from the ROI (similar to the procedure for *Linear Local Context Objects*).

4.1 Assignment of Extracted Linear Local Context Objects to ATKIS Segments

The decision if a *Linear Local Context Object* is assigned to a certain ATKIS segment depends on a) the width of the extracted object, b) the quality measures of both objects and c) the modeled topologic relation. The ROI in which an extracted local context object must be situated is a buffer with the radius $r_{ROI} = \Delta + w_O + d_{max}$ around the respective segment of the ATKIS Carriageway. The value Δ is the sum of all certainty values given for the ATKIS-Segment and the extracted *Linear Local Context Object*: $\Delta = \Delta_A + \Delta_O$, with $\Delta_A = \Delta_{wA} + \Delta_{pA}$ and $\Delta_O = \Delta_{wO} + \Delta_{ppO} + \Delta_{paO} + 2\sigma_{pO}$. Note that the precision σ is here converted to a certainty measure by means of the 2σ calculus as the ROI can be interpreted as a 95%-confidence area of the two segments.

4.2 ROI-Definition and Extraction of Road Objects

The calculation of r_{ROI} for the subsequent extraction of road objects is similar to the definition above: $r_{ROI} = \Delta = \Delta_A + w_O + \Delta_O$ with $\Delta_O = \Delta_{wO} + \Delta_{paO} + 2\sigma_{pO}$. As the width of the extracted objects is unknown a priori a predefined value can be used, keeping in mind its impact to the assessment result. If however a road extraction was performed independently of ATKIS data no assumptions have to be made.

4.3 Assessment of ATKIS Segments Using Hint-Theory

In the relationship model the topologic and geometric relationship between an ATKIS segment and the segments of *Linear Local Context Objects* (resp. the *Extracted Road Objects*) are defined. It is now desirable to exploit this knowledge in the assessment phase. This means two frames of discernment can be defined: a) $\Theta_G = \{G, \neg G\}$ which includes the hypothesis G expressing that the segment of the extracted object and the ATKIS segment coincide with respect to geometric relations, respectively its negation $\neg G$ and b) $\Theta_T = \{T\}$ including hypothesis T which refers to the topologic relations. Note that the complementary hypothesis regarding topology ($\neg T$) is not included. This is motivated by the fact that it is already assured in the assignment phase that a considered extracted road or context object has an impact to the respective ATKIS object. Thus it is clear that it supports T . The question is to what degree it does support this hypothesis.

The focal sets are not completely disjoint: any object just gives as much evidence for the hypotheses that an ATKIS segment and this object coincide regarding the modeled relation as justified by the respective measures and quality values. Here the advantage over traditional probability theory or a Bayesian approach is exploited: the formulation of ignorance is possible.

4.3.1 Hints Regarding Topologic Relations

For the examination of the topologic relations between two objects the approach presented in (WINTER 1996, WINTER 1998) is applied. In that work the topologic relations between imprecise and uncertain regions are assessed. Winter shows that all eight topologic relations two objects may undergo can be derived from the minimum and maximum distance between so called certain zones. The application of this approach to the given problem is described in detail in (GERKE 2004). All modeled relations can be assessed by this approach. The probability p_t that a given pair of segments maintains the modeled topologic relation is used for a Hint H_T containing the hypothesis that the current segments coincide with the model.

The focal sets and the assigned probabilities H'_T are shown in Tab. 1. Here two more parameters are involved in the confidence measure: p_{con} is the confidence assigned to the extracted object. The evidence given by an object is the more credible the more confident it is. The parameter q_{cov} expresses to what degree the segment of the extracted object covers the ATKIS segment which is to be assessed. This factor is important in order to limit the impact of a Hint given from an object to the proportion it influences the ATKIS segment. The focal set Θ_T represents ignorance.

Ω	Γ	P
ω'_{T1}	$\{T\}$	$p_t \cdot q_{cov} \cdot p_{con}$
ω'_{T2}	Θ_T	$1 - p(\omega'_{T1})$

Table 1: Hint H'_T

The final Hint H_T regarding the topologic relation is also influenced by the width of the two objects in case the side condition *identical width* is given for the relation *contains* (if it is not required then $H_T = H'_T$). The difference of

widths must be zero, but the certainty of the widths measure must also be considered. Therefore H_W is introduced which supports T depending on the difference of width and the given certainties. From the combination of H'_T and H_W applying Dempster's Rule follows H_T .

4.3.2 Hints Regarding Geometric Relations

Similar to the judgment of topologic relations a measure is needed describing to what extent the modeled geometric relation is maintained by two objects.

The calculation of the Hint H_G concerning the question whether two segments are parallel is done in the following manner. If the direction of those two segments is given by t_A and t_O the angle enclosed is $\alpha = |t_A - t_O|$. In the given problem it is sufficient to define α on $[0, \pi/2]$. Parallelism means that α may not exceed a certain value. This fixed threshold is α_p and set to $\alpha_p = 15^\circ$.

The probability $p(\alpha < \alpha_p)$ depends on the precision given for the objects (it is presumed that quality measures assigned to the single segments are the same as assigned to the object). Further it is assumed that the certainty of the segments has no significant effect on the computation of the direction, because a certainty in the given context is understood as an unknown displacement of the whole object, and such a displacement has no impact on the direction. As a standard deviation for the position of an ATKIS segment is not given in the model the standard deviation σ_α just depends on σ_{pO} , the precision given for the extracted segment:

$$\sigma_\alpha = \sigma_{tO} = \frac{\sigma_{pO}}{L_O}$$

with L_O : Length of the respective segment. The probability $p(\alpha < \alpha_p)$ can now be calculated using the Gaussian probability density function for α :

$$p(\alpha < \alpha_p) = F(\alpha_p) = \int_{-\infty}^{\alpha_p} f(\alpha) d\alpha$$

Ω	Γ	P
ω_{G1}	$\{G\}$	$p(\alpha < \alpha_p) \cdot q_{cov} \cdot p_{con}$
ω_{G2}	$\{\neg G\}$	$(1 - p(\alpha < \alpha_p)) \cdot q_{cov} \cdot p_{con}$
ω_{G3}	Θ_G	$1 - p(\omega_{G1}) - p(\omega_{G2})$

Table 2: Hint H_G

The Hint H_G allows three interpretations as shown in Tab. 2. In contrast to H_T this Hint also supports $\neg G$. As the objects are assigned to the respective ATKIS segment without considering the geometric relation it is reasonable to

support $\neg G$ here.

4.3.3 Combining Hints for one ATKIS Segment

The Hints defined in the last two sections refer to the relation between an ATKIS segment and a segment of the extracted objects. Applying Dempster's Rule all Hints referring to one

ATKIS segment can be combined. The Hints H_T^S and H_G^S are thereby computed, representing the overall coincidence of the ATKIS-Segment to the model with respect to both relations. The frame of discernment $\Theta = \Theta_T \times \Theta_G$ containing hypotheses whether the ATKIS segment fits to the model (H^S) or not ($\neg H^S$).

5 Results

In this section preliminary results of the introduced approach are given. In order to investigate whether the quality of ATKIS objects is reflected by means of *Extracted Road Objects* and *Linear Local Context Objects* some experiments were carried out. The *Extracted Road Objects* are obtained by the approach presented in (GERKE et al. 2004). The parameters are trimmed for a very strict road extraction, because the influence from artificially inserted road segments (due to automatic gap bridging) should be very low. Those gaps are often caused by vegetation and the intention of the following experiments is to test if explicitly

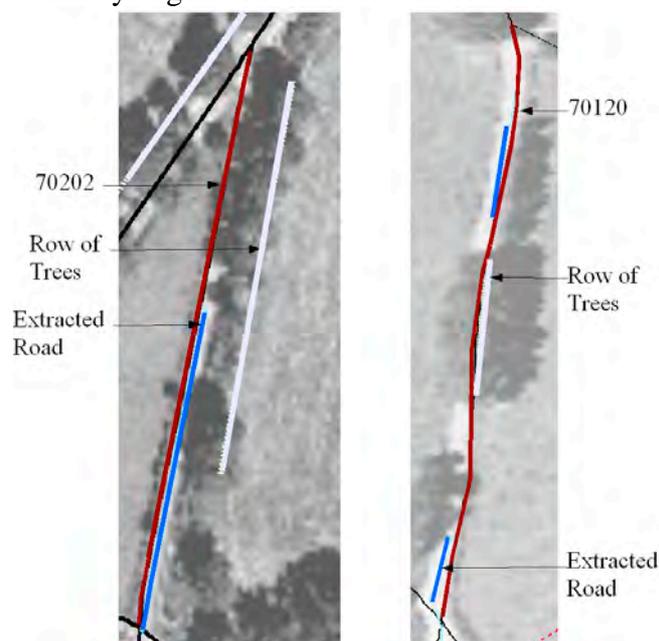


Figure 2: Objects 70202 (left) and 70120 (right), Orthoimage and ATKIS ©Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen

Exp.	#Seg.	sp_T	sp_G	pl_G	sp_S	pl_S
a)	1	0.52	0.75	0.99	0.88	1.00
	2	0.66	0.71	0.97	0.90	0.99
	3	0.40	0.39	0.99	0.63	1.00
b)	1	0.52	0.75	0.99	0.88	1.00
	2	0.66	0.74	0.98	0.91	0.99
	3	0.48	0.68	0.88	0.82	0.93
c)	1	0.18	0.92	0.99	0.94	0.99
	2	0.07	0.82	0.97	0.83	0.97
	3	0.34	0.73	0.92	0.82	0.95

Table 3: Results for 70202 (3 segments)

Exp.	#Seg.	sp_T	sp_G	pl_G	sp_S	pl_S
a)	1	0.57	0.20	0.70	0.59	0.85
	2	—	—	—	—	—
	3	0.52	0.25	0.79	0.60	0.89
	4	0.14	0.17	0.83	0.27	0.85
b)	1	0.58	0.28	0.73	0.64	0.86
	2	0.00	0.39	1.00	0.39	1.00
	3	0.54	0.35	0.81	0.67	0.90
	4	0.17	0.13	0.65	0.24	0.70
c)	1	0.25	0.36	0.79	0.49	0.83
	2	0.00	0.44	1.00	0.44	1.00
	3	0.45	0.35	0.78	0.60	0.86
	4	0.04	0.12	0.74	0.14	0.75

Table 4: Results for 70120 (4 segments)

inserted context objects give adequate evidence. As the road extraction algorithm is not able to reliably extract roads in built-up areas the examples are restricted to open landscape areas. The rows of trees representing a class of *Linear Local Context Objects* are captured manually and the parameters for the rows of trees are uniformly set to $w_o = 1m$, $\Delta_{wO} = 0.2m$, $\Delta_{ppO} = 2m$, $\Delta_{paO} = 3m$, $\sigma_{pO} = 0.6m$, $p_{con} = 1$.

Three experiments have been accomplished with the correct data: a) assessment of ATKIS segments using extracted road objects, b) additional incorporation of rows of trees and c) like b) but with decreased certainty and precision for ATKIS (set to zero). Two examples are chosen to clarify the sketched behavior of the approach. The left image in Fig. 2 shows ATKIS object 70202 being covered to approx. 50% by an extracted road object and another 70% by a row of trees. The right image show ATKIS object 70120 being covered to approx. 20% by extracted road and to another 20% by a row of trees. The detailed assessment results for 70202 are given in Tab. 3, Tab. 4 shows details for 70120. In the five columns the following information is given: 1) the support for the ATKIS segments regarding the

topologic relation, 2) and 3) the support and the plausibility for the ATKIS segments regarding the geometric relation and 4) and 5) the outcome from the combination. The plausibility regarding the topologic relation is not defined as $\neg T$ is not supported. The first example demonstrates very good support for the segments as these are fully covered (compare experiment a) to b)). The support for the geometric relation in experiment c) increases for some segments as the ROI decreases and therefore the rows of trees in the northern part (which are not parallel to the ATKIS segment) are not taken into account. In the second example the support is not very good as the coverage is not sufficient. But the relatively high plausibilities allow the conclusion that the existing extracted objects give not much evidence against the hypothesis that the ATKIS segments coincide well with the model. A more detailed sensitive analysis can be found in (GERKE 2004).

6 Conclusions and Outlook

In this paper an approach for quality assessment of ATKIS road vector data is introduced. A relationship model contains the object class to be assessed and the object classes in topologic and geometric relation to it. Besides the relations quality measures are defined having an impact on the subsequent assessment phase. Here extracted objects are assigned to the ATKIS segments according to the modeled topologic relation and the respective given quality measures. Afterwards the existing topologic and geometric relations between any ATKIS segment and the assigned objects are assessed. The given evidence is collected and combined using Hint-Theory which is an approach to the Dempster-Shafer Theory of evidence. By this means any ATKIS segment obtains a certain portion of support and plausibility expressing its compliance to the model.

First results show that the quality of ATKIS road vector data is reflected by means of this approach. In further work it will be investigated how a final verification decision (whether an ATKIS object will be accepted or rejected) can be derived from the support and plausibility measures for the segments. It was shown with the examples that for an acceptance both values must exceed a certain threshold, the definition of this threshold is a matter of further research.

Moreover it has to be investigated whether a substitution of the simple equipartitioned statistical model for the analysis of topologic relations by a more individual density function does improve the analysis.

Another potential improvement concerns the global network aspect: the road network is designed to connect important places by an optimal path and every road object gives a certain contribution to this network. In the presented evidential framework this contribution can be judged and considered for the assessment.

Concerning the update of the road network, i.e. the detection of roads not currently contained in the database, it is to investigate to what extent the given approach can be used. For example, it will be possible to formulate hypotheses for new roads based on the accepted network and additional information from other sources or from road extraction algorithms. Such hypotheses may then be judged in a similar way the given road network is assessed.

Last but not least the evaluation of object extraction algorithms is very important. In this paper a formal framework for the assessment of road vector data is given, but the overall result still depends on the quality of input information.

Acknowledgment

This work was funded by the German Federal Agency for Cartography and Geodesy (BKG).

References

- DEMPSTER, A., 1967: *Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping*. *Annals of Mathematical Statistics*, 38:325-339.
- GERKE, M., M. BUTENUTH, C. HEIPKE and F. WILLRICH, 2004: *Graph Supported Verification of Road Databases*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58(3-4):152-165.
- GERKE, M., 2004: *Quality assessment of road databases using aerial imagery*. In: *IAPRS*, 35, to appear at XX. ISPRS congress in Istanbul.
- GORDON, J. and E. H. SHORTLIFFE, 1990: *The Dempster-Shafer Theory of Evidence*. In: (SHAFER&PEARL 1990), 529 -539.
- HINZ, S., 2003: *Automatische Extraktion urbaner Straßennetze aus Luftbildern*. Doktorarbeit, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der TU München.
- HINZ, S. and A. BAUMGARTNER, 2000: *Road Extraction in Urban Areas Supported by Context Objects*. In: *IAPRS*, 33: 405-413. Part B3.
- KOHLAS, J. and P. MONNEY, 1995: *A Mathematical Theory of Hints. An Approach to Dempster-Shafer Theory of Evidence*, 425 IN *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. Springer-Verlag.
- MAYER, H., 1998: *Automatische Objektextraktion aus digitalen Luftbildern*. Habilitationsschrift, Deutsche Geodätische Kommission. Series C, Vol. 494.
- SHAFER, G., 1976: *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton University Press, Princeton.
- SHAFER, G. and J. PEARL, Eds., 1990: *Readings in Uncertain Reasoning*. Morgan Kaufmann Publishers.
- WINTER, S., 1996: *Unsichere topologische Beziehungen zwischen ungenauen Flächen*. Doktorarbeit, Deutsche Geodätische Kommission. Series C, Vol. 465.
- WINTER, S., 1998: *Uncertain Topological Relations between Imprecise Regions*. Technischer Bericht, Fachbereich Geoinformation, TU Wien.

Automatische Feingeokodierung von SAR-Bildern mittels robuster Karte-zu-Bild-Registrierung

GÜNTER SAUR¹ & WOLFGANG KRÜGER

Zusammenfassung: Die Bilderzeugung bei einem luftgestützten Radar mit synthetischer Apertur (SAR) erfordert generell möglichst genau gemessene Bewegungsdaten. Im Fall sehr hoch aufgelöster oder aus großer Entfernung aufgenommener SAR-Bilder sind die Messanforderungen jedoch so hoch, dass die Erzeugung focusierter Bilder meist erst mit speziellen Algorithmen gelingt. Die direkte Geokodierung dieser Bilder allein aus den Sensor- und Navigationsparametern ist dann zu ungenau und muss durch eine bildbasierte Feinkorrektur verbessert werden.

Der folgende Beitrag schildert die Anwendung einer Karte-zu-Bild-Registrierung, welche die vollautomatische Feingeokodierung der SAR-Bilder durchführt, sofern eine (abschnittsweise) starre Bildgeometrie und eine Vektorkarte der Szene vorliegen, die kartierten Linienstrukturen im Bild sichtbar sind sowie Szene, Abbildungsgeometrie und Bildqualität nicht zu ungünstig sind. Das ursprünglich zur Registrierung optischer Luftbilder auf Vektorkarten von Straßen und Wegen entwickelte Verfahren ist sehr effizient und zeigt sich robust gegenüber Fehlern in Vorregistrierung und Karten (KRÜGER 2001). Speziell für SAR wurden Merkmalsextraktion und Abbildungsgeometrie angepasst. Experimentell wurden reale SAR-Bilder mit realen Vorregistrierungsfehlern erfolgreich in Echtzeit auf Standard-PC Hardware feingeokodiert. Ein praktischer Einsatz ist somit prinzipiell möglich.

1 Einleitung

Aus Sicht des Nutzers stellt die Geokodierung eine wichtige Vorbedingung für Bildbehandlung dar (Bildarchivierung, kartengestützte Bildauswertung, multimodale Datenfusion). Eine gängige Repräsentation geokodierter Bilddaten besteht in ihrem Bezug auf ein kartographisches (geodätisches) Koordinatensystem mit der Möglichkeit der Überlagerungsdarstellung in einem geographischen Informationssystem (GIS, siehe Abb. 1).



Abb. 1: Geokodiertes SAR-Bild in kartographischen Koordinaten vor Kartenhintergrund

Mit höherer Auflösung der Bilder wachsen allerdings auch die Anforderungen an die Genauigkeit der Geokodierung. Für optische Messbilder können mittlerweile unter günstigen Bedingungen (erfolgreiche Kalibration) die Bewegungsparameter (GPS/IMU) so genau gemessen werden, dass die parametrische Abbildung exakt beschrieben und, bei Vorlage eines ge-

¹ Fraunhofer Institut Informations- und Datenverarbeitung IITB, Fraunhoferstr. 1, 76131 Karlsruhe, Tel. +49 721 6091 230, Fax +49 721 6091 413, saur@iitb.fraunhofer.de, www.iitb.fraunhofer.de/ers

nauen Höhenmodells der Szene, die Bilder bis in den Bereich der Auflösungsgrenze direkt geokodiert werden können (HEIPKE ET AL. 2002).

Ein entsprechendes Vorgehen für SAR findet man im Fall von Satelliten in MEIER ET AL. 1993 und FREY ET AL. 2004 sowie im luftgestützten Fall in ISAACS 2003. Allerdings erfordern sehr hoch aufgelöste oder aus großer Entfernung aufgenommene SAR-Bilder spezielle Algorithmen innerhalb der Bilderzeugung (autofocus, motion compensation), um ungenaue Bewegungsmessungen auszugleichen. Die direkte Geokodierung dieser Bilder allein aus den Sensor- und Bewegungsparametern ist meist zu ungenau und muss daher durch eine bildbasierte Feinkorrektur verbessert werden. Unter der Voraussetzung einer konsistenten SAR-Abbildungsgeometrie stellt dieser bildbasierte Ansatz auch im anderen Fällen ungenauer Positionsmessungen eine geeignete Lösung für die Fein-Geokodierung dar.

Im Folgenden wird die Anwendung einer Karte-zu-Bild-Registrierung vorgestellt, welche vorregistrierte SAR-Bilder mittels Vektorkarten von Straßen und Wegen feingeokodiert. Vorrangig sind hohe Anforderungen an Effizienz und Robustheit zu erfüllen, um die zu erwartenden Fehler in Vorregistrierung und Karte auszugleichen und um die richtige Auswahl unter den zahlreichen extrahierten Bildmerkmalen zu treffen, welche aufgrund der Eigenschaften von SAR-Bildern vielfältige Störungen aufweisen.

2 Geokodierung von SAR-Bildern

2.1 Affine Korrekturtransformation

Geokodierung ist eine Abbildung, welche jedem Pixel eines Bildes einen Ort im Raum zuordnet, angegeben etwa als Punkt in geodätischen Koordinaten (Abb. 2). Die Szene wird beschrieben durch ein 3D-Szenenmodell bestehend etwa aus kartographischen Objekten und einem digitalen Höhenmodell. Die (parametrische) Sensorabbildung wird angegeben durch das Sensormodell samt Sensor-, Lage- und Orientierungsparameter. Die direkte Geokodierung ist dann die räumliche Rückprojektion der Sensorabbildung vom Bild auf die Grundebe-
ne oder eine andere Bezugsebene.

Mit der Feingeokodierung werden Lageabweichungen zwischen Bild einerseits und mittels Sensormodell abgebildeter Szene andererseits korrigiert. Aus der Sensorabbildung als Vorregistrierung wird durch Bild-Karte-Vergleich mit dem beschriebenen Verfahren eine Karte-zu-Bild-Korrekturtransformation geschätzt. Im Fall kleiner Abweichungen lässt sich die resultierende Rückprojektion (Feingeokodierung) durch Verkettung der inversen Korrekturtransformation und der direkten Geokodierung berechnen.

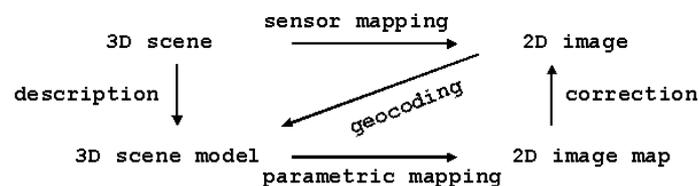


Abb. 2: Abbildung und Beziehungen bei der Geokodierung

Stammt der dominierende Fehlerbeitrag von fehlerbehafteten x/y-GPS-Messungen und ist die Szene weitgehend flach, so setzt sich die Korrekturtransformation aus Translation und Rotation zusammen. In der Praxis ist der Rotationsanteil sehr gering, während andererseits ein nicht verschwindender Skalierungsanteil zu beobachten ist. Damit ergibt sich eine Helmert- oder RST-Transformation (RST = Rotation + Skalierung + Translation).

Ungenau z-GPS-Messungen oder ungenaue Höhenmodelle der Szene bewirken zusätzlich, dass SAR-Bilder in Azimut- und in Entfernungsrichtung unterschiedliche Skalierungen aufweisen können. Daher wird hier für SAR-Bilder der Transformationstyp affin betrachtet.

2.2 Approximation durch perspektivische Zeilenabbildung

Es erscheint zweckmäßig, die SAR-Abbildungsgeometrie mit ihren vielfältigen Effekten (Abschattung, Verkürzung/foreshortening usw.) durch eine passende optische Abbildung anzunähern. Nach Sichtung diverser Ansätze in der Literatur (siehe etwa HARTLEY & SAXENA 1997 sowie dort angegebene weitere Referenzen) wurde der nun folgende Zugang formuliert, welcher in bestimmten Grenzen eine hinreichende Näherung bietet und der Geometrie des Zeilenabtasters (linear pushbroom) entspricht.

Für eine einzelne SAR-Zeile (der Einfachheit halber sei ein Squintwinkel von 0 angenommen) kann eine perspektivische Sicht angegeben werden, welche – zu einem gewissen Grad – der Schrägentfernungsgeometrie des SAR (slant range) äquivalent ist (siehe Abb. 3).

Nimmt man die virtuelle Beobachterposition in E und die Beleuchtungsposition in S an, so entspricht das Abbild der Strecke NF der SAR-Schrägentfernungszeile $r_F=SF$, wobei als SAR-Sensorposition ebenfalls S angenommen wird. Die Abbildungsgeometrie ist exakt für alle Punkte P im Bereich zwischen N und F, für die der Mittelpunkt P' von PR mit $R = PE \cap SF$ auf dem Thaleskreis über SE durch F liegt. Die Abweichung Δr zwischen der realen SAR-Schrägentfernungsposition auf $r=SP$ für einen Punkt, der nicht auf dem Thaleskreis liegt und der den Winkelabstand δ zu S hat, ist gegeben durch

$$\Delta r = \frac{1}{2}r\delta^2, \text{ für kleine } \delta.$$

In Azimutrichtung entspricht die Abbildungsgeometrie einer Parallelprojektion, und damit entspricht die gesamte Abbildung der eines Zeilenabtasters (line scanner, linear pushbroom, HARTLEY & SAXENA 1997).

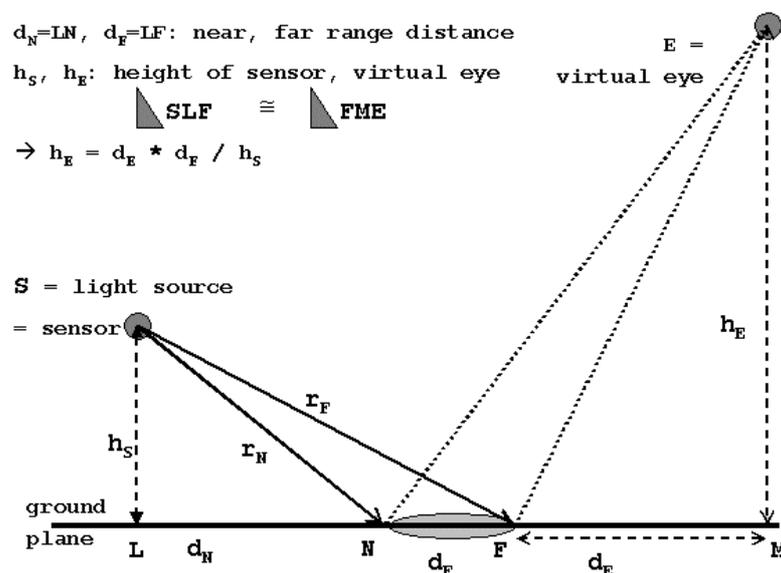


Abb. 3: Perspektivische Sicht der SAR-Zeile NF aus der virtuellen Beobachterposition E mit der Beleuchtungsposition S (= SAR-Sensorposition)

Die Näherungsabbildung ist angebracht für Szenen mit nicht zu starker Hangneigung, wenn noch keine Radarstrahlüberlagerung auftritt (overlay, bei nicht zu steilem Radareinstrahlwinkel). In unserem Modell wird nur die Bildgeometrie angenähert, der lokale Radareinstrahlwinkel unterscheidet sich jedoch um 90° vom Sehstrahl im angenäherten optischen Modell.

Dieses Modell wird im Fall nicht-flacher Szene als genäherte Sensorabbildung verwendet, um die Karte in das Bild zu transformieren. Sofern dieses Modell sich als hilfreich erweist, um SAR-Bilder zu verstehen und auszuwerten, ergeben sich weitere Anwendungsmöglichkeiten in Schulung und Unterstützung bei der visuellen menschlichen SAR-Auswertung.

3 Karte-zu-Bild-Registrierung

Das Verfahren setzt sich zusammen aus einem Schritt zur SAR-spezifischen Extraktion von Linienmerkmalen und einem Schritt zu deren Zuordnung zu Kartenmerkmalen bei gleichzeitiger robuster Schätzung einer globalen affinen Transformation. Das Zuordnungsverfahren wurde bereits in einer früheren Anwendung auf optische Bilder im Vergleich zu zwei anderen Verfahren bewertet (SAUR 2000).

3.1 Vorverarbeitung

Nach Reduktion des Speckle-Rauschens und des Dynamikumfangs erfolgt eine Bildfilterung sowie die Skalierung der Pixelgröße durch Neuabtastung, so dass die Bilder in einem Maßstab vorliegen, welcher zur Extraktion von Straßen und Wegen in einem vorgegebenen Breitenbereich geeignet ist. Die in geodätischen Koordinaten gegebene Vektorkarte wird mittels Vorregistrierung in Bildkoordinaten transformiert und am Bildbereich beschnitten. Schließlich erfolgt sowohl im Karten- als auch im Bildbereich eine Bereinigung von kurzen Liniensegmenten durch Verschmelzen oder Aussondern.

3.2 Registrierung

Die Karte-zu-Bild-Registrierung wird formuliert als Optimierungsproblem, bei dem eine Transformation zu schätzen ist, welche transformierte Kartenliniensegmente und Bildliniensegmente am besten zur Deckung bringt (KRÜGER 2001). Zuordnung und Parameterschätzung erfolgen in einem einzigen Schritt durch Optimieren einer Zielfunktion, die auf M-Estimatoren beruht und vom Überlappungsgrad und vom gewichteten Abstand (senkrecht zur Linienrichtung) zwischen transformierten Karten- und Bildliniensegmenten abhängt. Das Verfahren ist für Transformationstypen ausgelegt, die von der ebenen projektiven Transformation umfasst werden. Für Anwendung auf SAR-Bilder wurde das Verfahren auf die Transformationstypen affin und Helmert eingestellt.

3.3 Bewertung

Ausführliche Tests des Registrierungsverfahrens wurden bereits bei der Entwicklung durchgeführt (KRÜGER 2001). Darüber hinaus erfolgte für den Fall optischer Bilder und für den Transformationstyp Helmert eine vergleichende „black box“-Bewertung von drei Verfahren, bei dem neben dem genannten Ansatz zwei weitere Verfahren betrachtet wurden (SAUR 2000). Alle drei Verfahren wurden auf einer Trainingsmenge durch die Entwickler von Hand optimiert und anschließend (mit eingefrorenen Parametereinstellungen) auf eine zuvor unbekannte Testmenge angewendet. Trainings- und Testmenge bestanden aus optischen Reihemessbildern, Vektorkarten und Vorregistrierungen, welche von der Referenzlage durch generierte, zufällige Fehlertransformationen abwichen.

Abb. 4 oben links zeigt Ergebnisse der Bewertungsfunktion als Diagramm mit dem hier betrachteten Verfahren in der Mitte, bezeichnet als L=IITB (Einheit 1% entspricht ca. 2 Pixel mittlere Fehlerabweichung an Kontrollpunkten über alle Bilder, Karten und Vorregistrierungen). Das Verfahren aus KRÜGER 2001 schnitt deutlich am besten ab, insbesondere traten

dort keine Ausreißer durch falsche Zuordnungen auf. Die Restungenauigkeit für ideale Karten lag im Bereich der Messgrenze (Abb. 4 rechts).

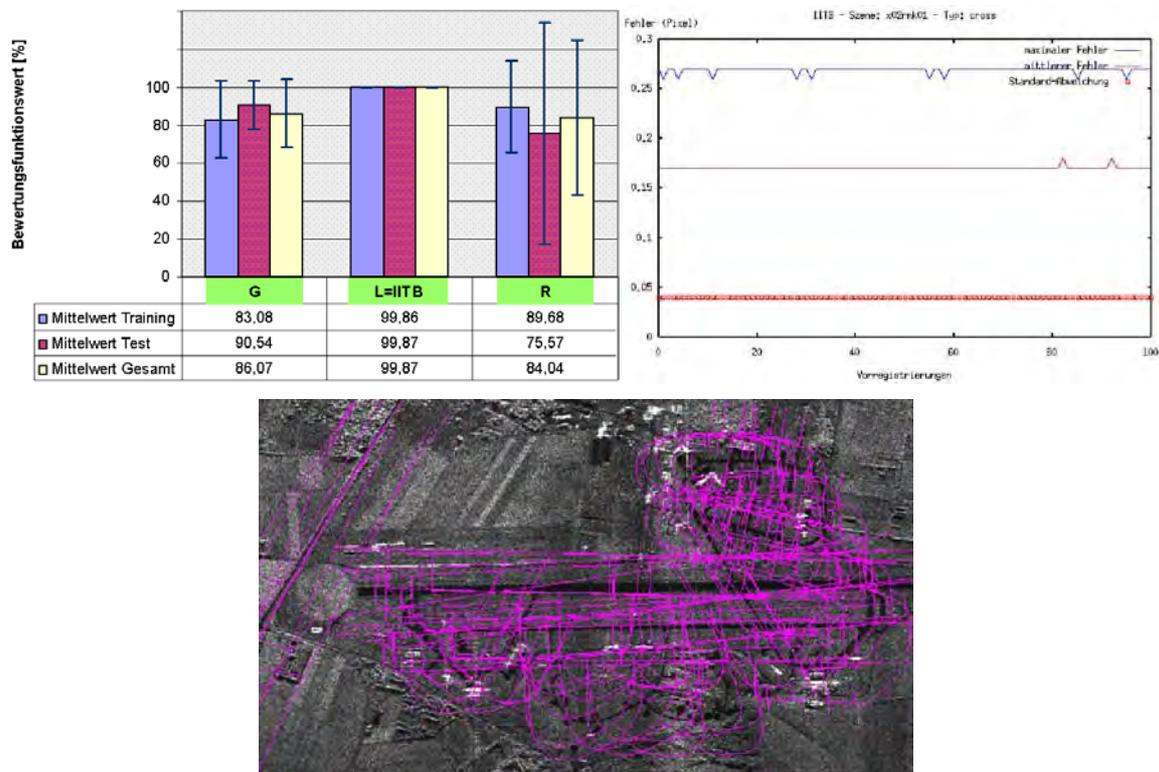


Abb. 4: Bewertungsergebnis für Vergleich von 3 Registrierungsverfahren (oben links, hier verwendetes Verfahren ist L=IITB mit bestem Ergebnis 100% und Streuung 0% in der Mitte), Restfehler über Variation der Vorregistrierungen für bestes Verfahren (oben rechts) und SAR-Bild mit überlagerten Vektorkarten in unterschiedlichen zufälligen Vorregistrierungen (unten)

Die Beschreibung des Bewertungsvorgehens ist in SAUR ET AL. 2000 sowie in SAUR 2000 zu finden. Abb. 4 unten zeigt schließlich ein SAR-Bild mit Vektorkarte und Vorregistrierungen aus einem Datensatz, welcher für eine weitere internationale Verfahrensbewertung verwendet wurde.

4 Anwendung und Ergebnisse

4.1 Beispiele und Test

Im hier illustrierten Beispiel wird das Registrierungsverfahren angewendet auf ein SAR-Bild und eine Vektorkarte, welche zuvor mittels der Vorregistrierung auf das Bild projiziert wurde. In Abb. 5 ist ein Bildausschnitt zu sehen (links) mit extrahierten schwarzen Liniensegmenten unterschiedlicher Breite (Mitte) sowie mit überlagerter Vektorkarte in Vorregistrierungslage und in korrigierter Lage (rechts). Abb. 6 links zeigt einen größeren Bildausschnitt. Die lokalen blauen Verschiebungsvektoren sind unterschiedlich ausgerichtet, da die Korrekturtransformation einen Skalierungs- und Rotationsanteil besitzt. Die Vektorkarte in Korrekturlage (rot) passt offensichtlich genau auf die dunklen Linien der Wege und Straßen im SAR-Bild. Mittels der globalen Transformation und der robusten Schätzung gelingt es, auch Bilder mit problematischen Bildbereichen fein zu geokodieren (Abb. 6 rechts).

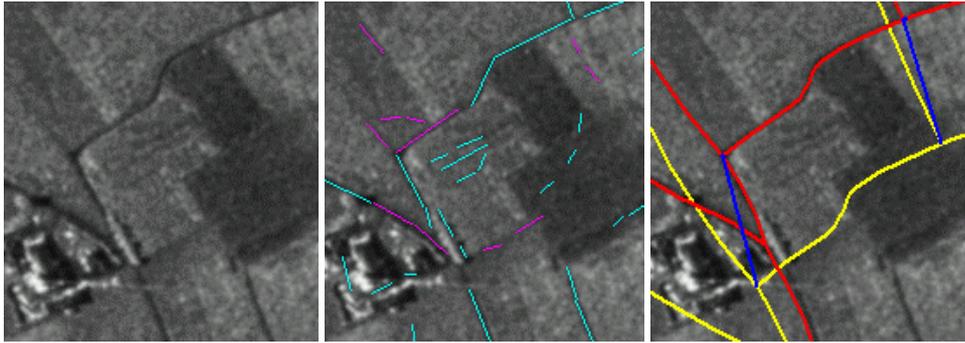


Abb. 5: SAR-Ausschnitt (links), extrahierte Liniensegmente (Mitte) und überlagerte Vektorkarte (rechts) mit Vorregistrierung (gelb) und Feinkorrektur (rot) sowie lokale Verschiebungsvektoren (blau)

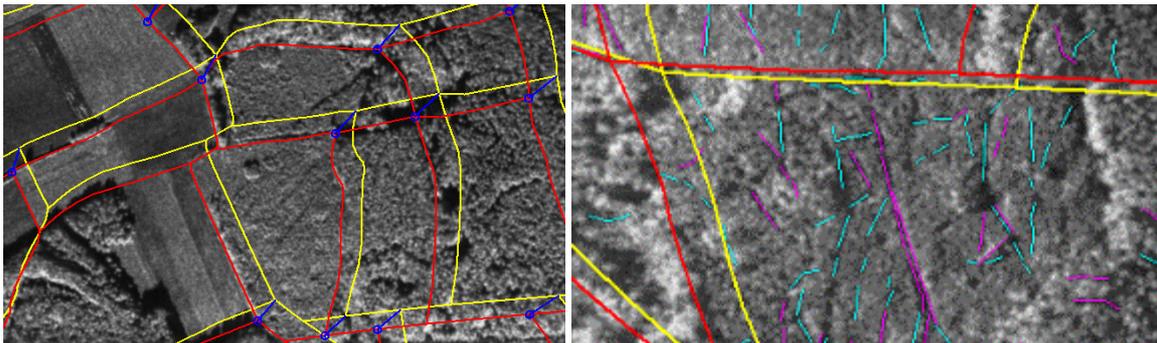


Abb. 6: Größerer SAR-Ausschnitt (links) sowie problematischer Teil einer größeren Szene (rechts): Schmale kartierte Wege im Waldbereich sind im SAR-Bild nicht sichtbar während deutliche Waldschneisen nicht kartiert sind. Registrierung ist auf Grund der umfassenden, günstigeren Szenenbereiche und wegen der Robustheit des Verfahrens dennoch möglich

Das Registrierungsverfahren wurde angewendet auf einen Datensatz von 4 Szenen mit je etwa 10 SAR-Bildern, aufgenommen mit luftgestützten SAR-Sensoren, u. a. DOSAR (siehe etwa HIPPLER 2002 sowie die dort angegebenen Referenzen). Für jede der Szenen lagen drei unterschiedliche Typen von Vektorkarten vor: eine einfache entsprechend einem Maßstab 1:100.000, eine weitere abgeleitet aus DLM 1/25 (ATKIS) sowie eine sehr genaue Karte, welche manuell auf einem Orthophoto erstellt wurde. Alle Paare (Bild, Karte) wurden zunächst eingeteilt in Klassen hinsichtlich der Schwierigkeit oder Lösbarkeit der Registrierungsaufgabe. Wenn Kartenvektoren im Bildbereich etwa nur an einem Rand auftreten (weil z. B. ein See oder andere Gründe für ein lokal zu weitmaschiges Straßen- und Wegenetz vorliegen) ist die Machbarkeit nicht gegeben. In den realen Vorregistrierungsfehlern wurden ein Translationsanteil von bis zu 100m, ein Rotationsanteil von bis zu 1° und ein Skalierungsfehler von bis zu 5% festgestellt. Dieser Gesamtfehler setzt sich zusammen aus GPS/IMU-Messung, Höhenunsicherheit sowie ungenauem Höhenmodell der Szene. Für alle Paare, für die die Machbarkeit offensichtlich war (z. B. hinreichend günstig verteilte Straßen sowohl in Bild als auch in Karte), war das automatische Registrierungsverfahren erfolgreich. Außerdem zeigte sich ein Erfolg auch in weit schwieriger erscheinenden Fällen, wo Straßen bereichsweise nicht kartiert waren und wo die Bilder Strukturen aufwiesen, die mit Straßen verwechselt werden konnten (Abb. 6 rechts). Es gab jedoch auch Fälle, wo das Verfahren keine Lösung finden konnte und Rückweisung signalisierte. In bestimmten Fällen konnte jedoch eine Helmerttransformation geschätzt werden, welche eine Verbesserung der Vorregistrierung erbrachte.

4.2 Ergebnisse

Der zuvor beschriebene Test erbrachte folgende Ergebnisse:

Transformationstyp: Die Wahl des affinen Transformationstyps erwies sich für alle betrachteten Szenen als geeignet. Die Szenen waren allerdings flach bis leicht hügelig und der Radareinstrahlwinkel war nicht zu steil. Hatte die Korrekturtransformation keinen echten affinen Anteil, so war eine Helmerttransformation zur Feingeokodierung hinreichend, und sie konnte überdies bei auftretenden Störungen stabiler geschätzt werden.

Genauigkeit: Die Feingeokodierung definiert ihren Nutzen durch die relative Verbesserung gegenüber der Vorregistrierung, gemessen an Hand der Abweichungen an Kontrollpunkten. Im Test konnte der mittlere lokale Translationsfehler von über 100m auf wenige Meter reduziert werden. Der Ansatz der globalen Transformation bewirkt, dass einerseits Fehler durch ungenaue Kartenvektoren ausgemittelt werden, andererseits aber die lokal erreichbare Genauigkeit durch mögliche SAR-Geometriefehler begrenzt ist.

Robustheit: Viele Testbeispiele haben die Robustheit des Ansatzes hinsichtlich Fehler in Vorregistrierung und Karte sowie hinsichtlich vielzähliger Clutter-Merkmale verdeutlicht.

Effizienz: Der Durchsatz beträgt mehrere Quadratkilometer pro Minute auf einem Standard-PC. Weiter bieten Beschleunigungsstrategien (z. B. Registrieren an Hand ausgewählter Bereichen innerhalb großflächiger Bilder) ein bisher noch nicht ausgenutztes Potential. Die Rechenzeit für die Feingeokodierung liegt in der gleichen Größenordnung wie die SAR-Bildaufnahme, und somit ist eine schritthaltende Verarbeitung möglich.

5. Folgerungen und Ausblick

Im Rahmen der Arbeiten wurde eine robuste und effiziente Karte-zu-Bild-Registrierung zur Feingeokodierung von SAR-Bildern angewendet. Ausgehend von einer fehlerbehafteten Vorregistrierung und einer Vektorkarte der Straßen und Wege wird eine affine Korrekturtransformation bestimmt, welche transformierte Karte und extrahierte Linienmerkmale optimal zur Deckung bringt. Die Feingeokodierung wird anschließend aus der Vorregistrierung und der Korrekturtransformation abgeleitet. Ein approximierendes Abbildungsmodell für SAR gestattet, neben flachen auch leicht hügelige Szenen zu bearbeiten.

In umfangreichen Tests konnte der lokale Translationsfehler von bis zu 100m auf wenige Meter reduziert werden. Im Prinzip ist die erreichbare Genauigkeit nur begrenzt durch die Kartengenauigkeit, die Bildauflösung und die Abbildungsgeometrie. Das Verfahren war in allen offensichtlich machbaren Testbeispielen erfolgreich. Zusätzlich wurde auch in schwierigeren Fällen eine Lösung gefunden.

Damit kann festgestellt werden, dass der vorgestellte Ansatz die Aufgabe der Feingeokodierung für reale SAR-Bilder löst. Schritthaltende Verarbeitung bezogen auf Bildaufnahme und SAR-Verarbeitungsablauf ist gegeben. Optimierungsmöglichkeiten für den praktischen Einsatz bestehen in der Anpassung auf einen spezifischen SAR-Sensor und seine Datencharakteristik sowie das Einstellen der Grenzen der zu erwarteten Fehler.

Weiterführende Arbeiten betreffen die Anpassung, Anwendung und Analyse für Szenen mit ausgeprägtem Höhenprofil und für SAR-Bilder mit steilerem Radareinstrahlwinkel (Abb. 7 links). Bild-zu-Bild-Registrierung ist ebenfalls ein wichtiges Anwendungsfeld, da für viele Szenen keine Vektordaten zur Verfügung stehen. Schließlich stellt die Bild-zu-Bild-Registrierung den Zugang zu höherer Genauigkeit und zur Sensordatenfusion dar (Abb. 7 rechts).

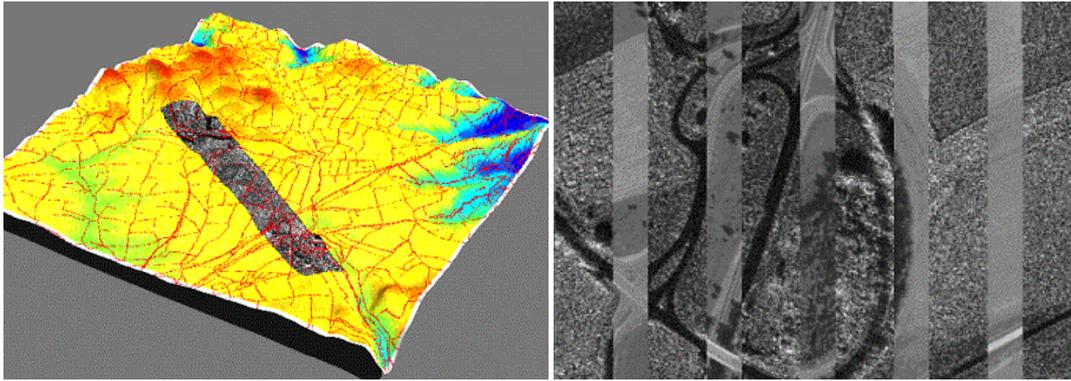


Abb. 7: Geokodiertes SAR-Bild mit digitalem Höhenmodell und überlagerter Vektorkarte (links) und Streifenanordnung eines geokodierten SAR-Bildes und eines geokodierten optischen Bildes (rechts)

Dank

Die vorgestellte Arbeit wurde vom Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung gefördert.

Literaturverzeichnis

- BROWN, L., 1992: A Survey of Image Registration Techniques, *Surveys*(24), No. 4, December 1992, pp. 325-376
- FREY, O.; MEIER, E.; NÜESCH, D.; ROTH, A.; 2004: Geometric Error Budget Analysis for TerraSAR-X, in *Proceedings EUSAR 2004*, Ulm, Germany, pp. 513-516, VDE 2004
- HARTLEY, R. I.; SAXENA, T.; 1997: The Cubic Rational Polynomial Camera Model, *Proceedings of Image Understanding Workshop (IUW)*, pp. 649-653, 1997
- HEIPKE, C.; JACOBSEN, K.; WEGMANN, H. (EDS.); 2002: Integrated Sensor Orientation - Test report and workshop proceedings, OEEPE Official Publication No. 43, 297p, 2002
- HIPPLER, J., 2002: High Resolution Airborne SAR at Long Range and Flat Gazing Angle, in *Proceedings EUSAR 2002*, Cologne, Germany, pp. 109-112, VDE 2002
- ISAACS, I. J., 2003: Intermap Technologies STAR-3i Accuracy & Evaluation Strategies, Intermap Technologies Inc., www.intermaptechnologies.com/intermap_library.htm, September 2003
- KRÜGER, W., 2001: Robust and efficient map-to-image registration with line segments, *Machine Vision and Applications*, ISSN: 0932-8092, Volume 13, Number 1, 38-50, 2001
- MEIER, E.; FREI, U.; NÜESCH, D.; 1993: Precise Terrain corrected Geocoded Images, in Schreier, G. (ed.): *SAR Geocoding: Data and Systems*, Wichmann Karlsruhe, pp. 173-185, 1993
- SAUR, G., 2000: Bewertung automatischer Verfahren zur Geokodierung von Luft- und Satellitenbildern, *Jahresbericht 2000*, www.iitb.fraunhofer.de, Fraunhofer IITB Karlsruhe, S. 50-51
- SAUR, G.; BIETZKER, C.; KRÜGER, W.; 2000: Bewertung von automatischen Geokodierungsverfahren, in Albertz, J. (Hrsg.), *Photogrammetrie und Fernerkundung: Neue Sensoren – Neue Anwendungen. Vorträge 19. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF. 13.-15. Oktober 1999*, Essen, Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung 8, Berlin 2000, S. 219-226
- SAUR, G.; KRÜGER, W.; 2004: Fine-geocoding of SAR using robust map-to-image registration, in *Proceedings EUSAR 2004*, Ulm, Germany, pp. 937-940, VDE 2004

Akquisition und Auswertung digitaler Hemisphärenbilder für waldökologische Untersuchungen

E. SCHWALBE¹, H.-G. MAAS¹, S. WAGNER², M. ROSCHER²

Zusammenfassung: Der Beitrag gibt einen Überblick über die Anwendung und Auswertung digitaler Hemisphärenbilder für die Ableitung photosynthetisch relevanter Strahlungswerte in Waldbeständen als Planungsgrundlage für Waldbaumaßnahmen. Die photogrammetrischen Arbeitsschritte innerhalb dieser Aufgabenstellung umfassen die Kalibrierung von Fischauge-Objektiven sowie die Segmentierung und Klassifizierung der Hemisphärenbilder hinsichtlich strahlungsrelevanter Bereiche.

1 Einleitung

Die hemisphärische Photographie ist ein etabliertes Instrumentarium zur Bewertung der Strahlungssituation in Waldbeständen. Sie wird seit Ende der 50iger Jahre (EVANS & COOMBE, 1959) zur Beurteilung der Besonnungssituation von Bäumen bei der Bewertung von Standortfaktoren angewandt. Der deutliche Vorteil gegenüber der Verwendung konventioneller Strahlungssensoren liegt in der räumlich aufgelösten Erfassung der Kronenstruktur durch eine Momentaufnahme. Alternative Strahlungsmesser wie PAR-Sensoren dagegen erfassen die Strahlungssituation lediglich als einen integralen Wert für die gesamte Hemisphäre. Bislang basierten strahlungsökologischen Analysen mittels Hemisphärenbildern hauptsächlich auf analoger Photographie, wobei sich die Auswertung im Wesentlichen auf Schwellwertuntersuchungen in gescannten Schwarzweißbildern konzentrierte (DOHRENBUSCH, 1989; WAGNER, 1998). Mittlerweile sind digitale Kameras erhältlich, deren Auflösung und Format eine Umstellung auf hochauflösende digitale hemisphärische Bilder ermöglicht. Vorteile digitaler Aufnahmen sind eine höhere radiometrische Qualität, eine bessere Reproduzierbarkeit und ein effizienterer Datenfluss. Für die hier gezeigten Untersuchungen wird eine 4500x3000 Pixel Kamera mit einem 180°-Fischauge-Objektiv verwendet.

Für die Auswertung der Hemisphärenbilder ergeben sich zwei Aufgaben: Durch die Verwendung eines Fischauge-Objektivs wird eine geometrische Modellierung für die Transformation vom Bild in die Hemisphäre sowie die Entwicklung eines geeigneten Kalibrierverfahrens und Kalibrierraumes notwendig. Die Hauptaufgabe besteht in der Entwicklung geeigneter Segmentierungs- bzw. Klassifikationsverfahren zur Bestimmung strahlungsrelevanter Bereiche im Bild. Dazu wird untersucht, wie die multispektralen Informationen der drei Kanäle der RGB-Farbaufnahmen sowie Texturparameter genutzt werden können.

¹ Dipl.-Ing. Ellen Schwalbe, Prof. Dr. habil. Hans-Gerd Maas, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden, Helmholtzstraße 10, 01062 Dresden, e-mail: ellen.schwalbe@mailbox.tu-dresden.de, hmaas@rcs.urz.tu-dresden.de

² Prof. Dr. forest. habil. Sven Wagner, MSc. Forestry Manuela Roscher, Institut für Waldbau und Forstschutz, Technische Universität Dresden, Piener Str. 8, 01737 Tharandt, e-mail: wagner@forst.tu-dresden.de, manuela.roscher.@forst.tu-dresden.de

2 Zielstellung

Das Ziel der Arbeiten ist es, waldbauliche Richtlinien für das Überleben, die Ansprüche und die Verschiedenartigkeit des Bodenbewuchses und von Jungpflanzen in Waldbeständen zu ermitteln. Eine hemisphärische Aufnahme von einem bestimmten Standpunkt innerhalb des entsprechenden Waldgebietes dient in erster Linie dazu, geometrische Informationen über die Struktur des Kronendaches abzuleiten. Aus dieser Information kann dann unter Anwendung meteorologischer Modelle, Strahlungsmodelle und der Simulation des Tages- und Jahresganges der Sonne über dem aufgenommenen Kronendach die photosynthetisch wirksame Strahlung ermittelt werden, die einer Pflanze an diesem bestimmten Standpunkt zur Verfügung steht.

Je genauer die Bereiche im Bild abgegrenzt werden können, welche für den Einfall von direkter Strahlung relevant sind, desto genauer können die Strahlungswerte verifiziert werden. Ziel ist somit die Generierung eines segmentierten Bildes, welches in bestmöglicher Genauigkeit die Abgrenzung des Kronendaches vom Himmel wiedergibt. Die Genauigkeit, mit der diese Abgrenzung geschehen kann, hängt im Wesentlichen vom Auflösungsvermögen der Kamera und von der Güte der verwendeten Segmentierungsroutine ab. Um die Methode zur Ermittlung von Strahlungsinformation auch in der Forstpraxis anwenden zu können, sind die Genauigkeitsanforderungen letztendlich auch auf ein praxisrelevantes Maß hin anzupassen. Hochauflösende Digitalkameras sind für die Praxis häufig zu teuer. Deshalb ist eine Segmentierung der Hemisphärenbilder im Subpixelbereich wünschenswert, um auch für geringere Auflösungen möglichst realitätsnahe Strahlungswerte ableiten zu können. Wichtig für die Praktikabilität der Methode ist auch deren Anwendbarkeit bei unterschiedlichen Wetter- und Bestandssituationen.

3 Daten

3.1 Studiengebiete

Die Anforderungen an eine Segmentierungsroutine für die Hemisphärenbilder hängen wesentlich von den Baumarten des auszuwertenden Testgebietes, sowie von der Wettersituation zum Zeitpunkt der Aufnahme ab. Bei den hier untersuchten Studiengebieten handelt es sich zum einen um einen Fichtenreinbestand (vgl. Abb. 1a) und zum anderen um einen gemischten Laubbaumbestand (vgl. Abb. 1b).

Neben dem grundsätzlichen Unterschied zwischen Laub und Nadelwäldern sind Fichtenbestände auch im Vergleich zu anderen Nadelwaldbeständen vergleichsweise dunkel. Da die Aufnahmen relativ kurz zu belichten sind, so dass die hellen Bereiche im Bild nicht überstrahlen, werden die Bäume unterbelichtet und erscheinen sehr dunkel. Damit sind die einzelnen Kanäle aufgrund des Rauschens stärker miteinander korreliert und die multispektrale Information des Bildes ist nur eingeschränkt zur Segmentierung nutzbar. Die Aufnahme des Fichtenbestandes entstand bei homogen bewölktem Himmel.

Um Informationen über den Unterschied der Auswertung in Laubwäldern und bei wolkenlosem bzw. teilweise bewölktem Himmel zu gewinnen, wurde eine weitere Testaufnahme untersucht, die eben diesen Eigenschaften entspricht. Bei Laubbäumen hat zusätzlich zur Wettersituation auch die Jahreszeit einen wesentlichen Einfluss auf Segmentierungskriterien, der sich nicht nur in der Belaubungsdichte der Bäume äußert, sondern auch in der Farbinformation der Blätter im Bild. Die hier vorliegende Aufnahme entstand im Herbst bei klarem Himmel.



(a)



(b)

Abb. 1: Studiengebiete

3.2 Besonderheiten hemisphärischer Kronendachbilder

Hemisphärenbilder weisen spezielle Charakteristiken bezüglich der Konstanz der Intensität, wetterbedingter Variationen sowie der Dominanz des Blaukanals auf. Dies bedingt, dass selbst innerhalb eines Einzelbildes keine einheitliche spektrale Signatur für die Klasse Himmel definiert werden kann. Ursächlich dafür sind zum einen der Helligkeitsunterschied von der Bildmitte zum Bildrand hin, sowie ein Helligkeitsunterschied in azimuthaler Richtung, der abhängig ist vom Stand der Sonne. Des Weiteren ist die spektrale Signatur abhängig von der Wettersituation. Eine Extremsituation bietet sich in dieser Hinsicht bei teilweise bewölktem Himmel. Ein weiterer wesentlicher Punkt, der die Klassifikation in Hemisphärenbildern von der Klassifikation von Fernerkundungsdaten unterscheidet, ist die Dominanz des blauen Kanals bei Bildern, die bei wolkenfreiem Himmel aufgenommen wurden. Probleme treten deshalb an dünnen Ästen und Asträndern im Bild auf, die in einem dunklen Blau erscheinen.

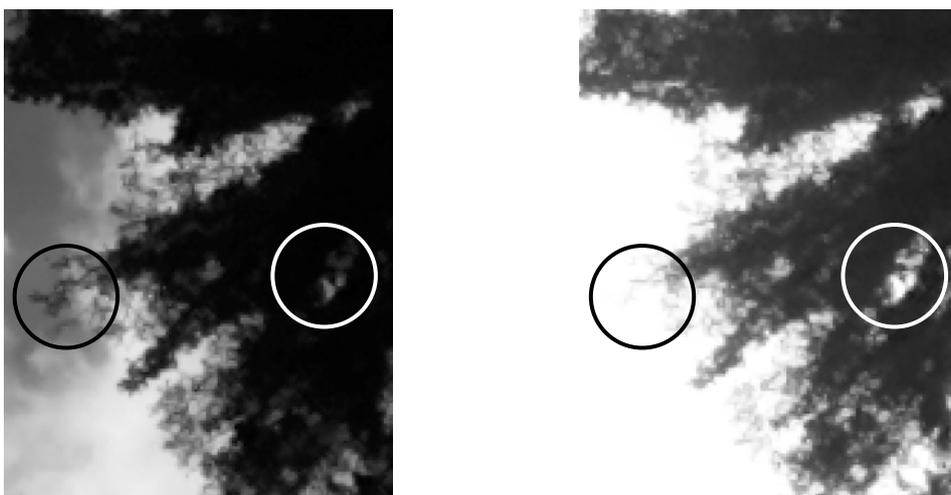


Abb. 2: Informationsverluste bei unterschiedlicher Belichtung

Da jedes Hemisphärenbild des Kronendaches einer Gegenlichtaufnahme entspricht, ist die Belichtung problematisch (vgl. Abb. 2). Wird zu lange belichtet, überstrahlen kleine Äste,

wird zu kurz belichtet, geht Information über sehr kleine lichtdurchlässige Stellen im Kronendach verloren. Wenn keine Kamera mit entsprechendem Dynamikumfang zur Verfügung steht, besteht eine Möglichkeit zur Kompensierung dieses Informationsverlustes in der Verwendung zweier Aufnahmen unterschiedlicher Belichtungsdauer. Problematisch bei der Nutzung mehrerer Bilder ist jedoch, dass der Zeitunterschied zwischen den Aufnahmen schon zu einer Strukturänderung des Kronendaches geführt haben kann und sich einzelne Äste aufgrund von Windbewegung in den zwei Bildern an verschiedenen Positionen befinden. Unter diesen Aspekten soll zunächst die Verwendbarkeit der Klassifizierungswerkzeuge kommerzieller Softwarepakete zur Segmentierung bzw. Klassifizierung der Hemisphärenbilder diskutiert werden.

4 Segmentierungs- und Klassifikationsmöglichkeiten mit kommerzieller Bildverarbeitungssoftware

Die Klassifikation der Hemisphärenbilder erfolgt generell in die zwei Hauptklassen Himmel und Vegetation. Als eine dritte Klasse wird gegebenenfalls die Klasse der Mischpixel definiert, welche Pixel enthält, die sich nicht eindeutig bzw. nur partiell einer der beiden Hauptklassen zuordnen lassen. Für diese Mischpixel soll in zukünftigen Untersuchungen geprüft werden, inwieweit sie zur subpixelgenauen Klassifizierung weiterverwendet werden können.

Die Quantifizierung der Qualität der klassifizierten Hemisphärenbilder ist schwierig, da keine konkret zählbaren Objekte separiert werden. Eine Beurteilung kann derzeit lediglich über einen subjektiven visuellen Vergleich von einzelnen Regionen des Originalbildes mit dem klassifizierten Bild erfolgen und über die Häufigkeit von Fehlklassifikationen, die durch diesen Vergleich erkannt werden. Zukünftige Arbeiten werden zusätzlich die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und den Vergleich mit PAR-Sensoren betrachten.

4.1 Klassifikationsmöglichkeiten mit ENVI

Die Bildverarbeitungssoftware ENVI bietet verschiedene Arten überwachter Klassifikation. Dabei erwies sich eine zuverlässige Klassifikation aufgrund der Inhomogenität der Klasse Himmel als schwierig. Die zufriedenstellendsten Ergebnisse konnten hier mit der *Maximum Likelihood* Klassifikation erreicht werden. Um auf die unterschiedlichen Eigenschaften der Klasse Himmel im Bild einzugehen, wurden zunächst ca. 7-10 verschiedene Klassen Himmel definiert. In Bildern, die nicht bei homogen bewölktem Himmel aufgenommen wurde, erhöht sich die Anzahl der notwendigen Klassen aufgrund der größeren Inhomogenität des Himmels. Die Eigenschaften jeder dieser Klassen wurden anhand von Trainingsgebieten im Bild festgelegt. Schließlich ist ein Schwellwert zu definieren, der aussagt, dass Pixel, deren Wahrscheinlichkeit, mit der sie zu einer Klasse gehören, für alle Klassen unter diesem Schwellwert liegt, als unklassifiziert eingestuft werden. Diese unklassifizierten Pixel bilden schließlich die Klasse Vegetation, welche in Abbildung 3b und 3c schwarz dargestellt ist. Alle Himmelsklassen werden zu einer gemeinsamen Klasse zusammengefasst (vgl. Abb. 3c). Die Abgrenzung zwischen den Klassen Himmel und Vegetation wird auf diese Weise subjektiv über die Definition von Steuerparametern vorgenommen. Die Einführung einer dritten Klasse, welche die Mischpixel repräsentiert, ist hier nicht praktikabel, da die spektralen Eigenschaften der einzelnen Pixel, die zu dieser Klasse gehören, sehr differenzieren und so häufig Fehlklassifikationen verursachen.

Problematisch ist, besonders bei Hemisphärenbildern von Laubwäldern, dass Blätter und Äste im Bild existieren, die aufgrund ihrer Ausrichtung viel Licht reflektieren. Diese Bereiche

werden häufig fälschlich als Himmel klassifiziert, da sie ähnliche spektrale Eigenschaften besitzen.

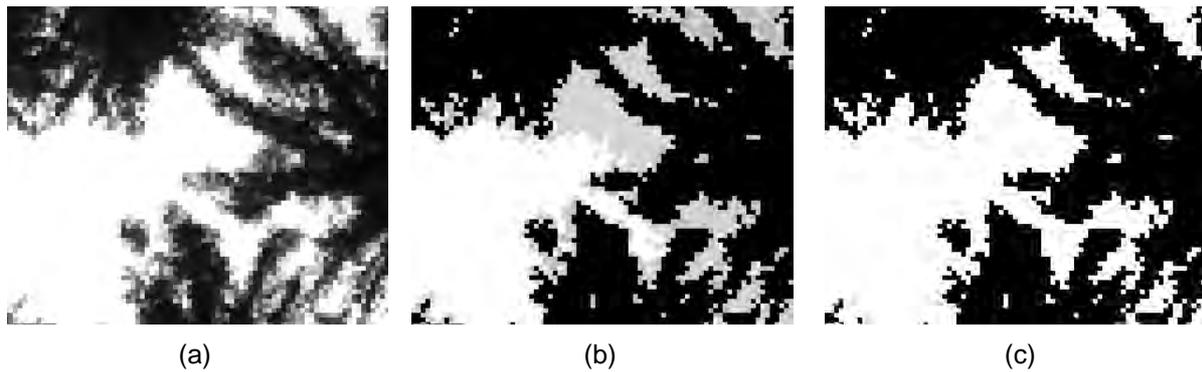


Abb. 3: Überwachte Maximum Likelihood Klassifizierung

4.2 Klassifikationsmöglichkeiten mit eCognition

Die Software eCognition bietet die Möglichkeit, objektorientierte Klassifikationen durchzuführen. Ein Überblick über die Wirkungsweise und praktische Anwendbarkeit der Software wird in (LEUKERT, 2002) gegeben. Der Arbeitsvorgang bei eCognition unterteilt sich in die zwei Schritte Segmentierung und Klassifikation. Für die Segmentierung ist zunächst für die einzelnen Bildkanäle eine Gewichtung vorzunehmen. Die drei Kanäle wurden dabei gleich gewichtet. Bei unbewölktem Himmel bietet es sich an, den blauen Kanal stärker zu gewichten. Die Segmentierung erfolgt über die Homogenitätskriterien Farbe und Form und ist somit texturbasiert. Für die Hemisphärenbilder ist das Homogenitätskriterium Farbe maßgeblich, da das Kronendach des abgebildeten Waldgebietes keine definierbaren geometrischen Formen enthält, nach denen segmentiert werden könnte. Der *Scale Parameter* beeinflusst die Größe der Segmente, die gebildet werden. Er sollte möglichst klein gewählt werden, um die Detailliertheit im Bild auch in den Segmenten zu bewahren. Aus einer großen Fläche freien Himmels wird ein entsprechend großes Segment gebildet. Zwischen den Ästen und Zweigen der Baumkronen existieren jedoch auch häufig einzelne Pixel, welche ebenfalls der Klasse Himmel entsprechen. Damit auch diese im Einzelnen erfasst werden können, hat sich ein *Scale Parameter* von 5 als günstig erwiesen.

Die Klassifizierung der segmentierten Bereiche erfolgte in die Klassen Himmel und Mischbereich. Alle nicht klassifizierten Pixel wurden als Vegetation definiert. Abbildung 4 zeigt das Ergebnis der Klassifikation mit eCognition. Die Klasse Himmel ist im Beispiel grau dargestellt, alle Pixel, die als gemischte Pixel identifiziert wurden, erscheinen im Bild weiss, und der dunkle unklassifizierte Bereich enthält diejenigen Pixel, die mit großer Wahrscheinlichkeit zu Bäumen gehören. Als aussagekräftigstes Kriterium zur Klassifizierung diente letztlich die Objekteigenschaft Helligkeit. Geometrische Eigenschaften wie Flächengrößen oder Umrisslängen der Segmente sind dagegen nicht als Klassifikationskriterien geeignet.

Deutliche Klassifizierungsprobleme treten bei überstrahlten Ästen und durch die inhomogene Helligkeit des Himmels in den verschiedenen Bereichen des Bildes auf. Deshalb werden am Bildrand häufig Pixel als Mischpixel klassifiziert, obwohl es sich um reine Himmelspixel handelte.

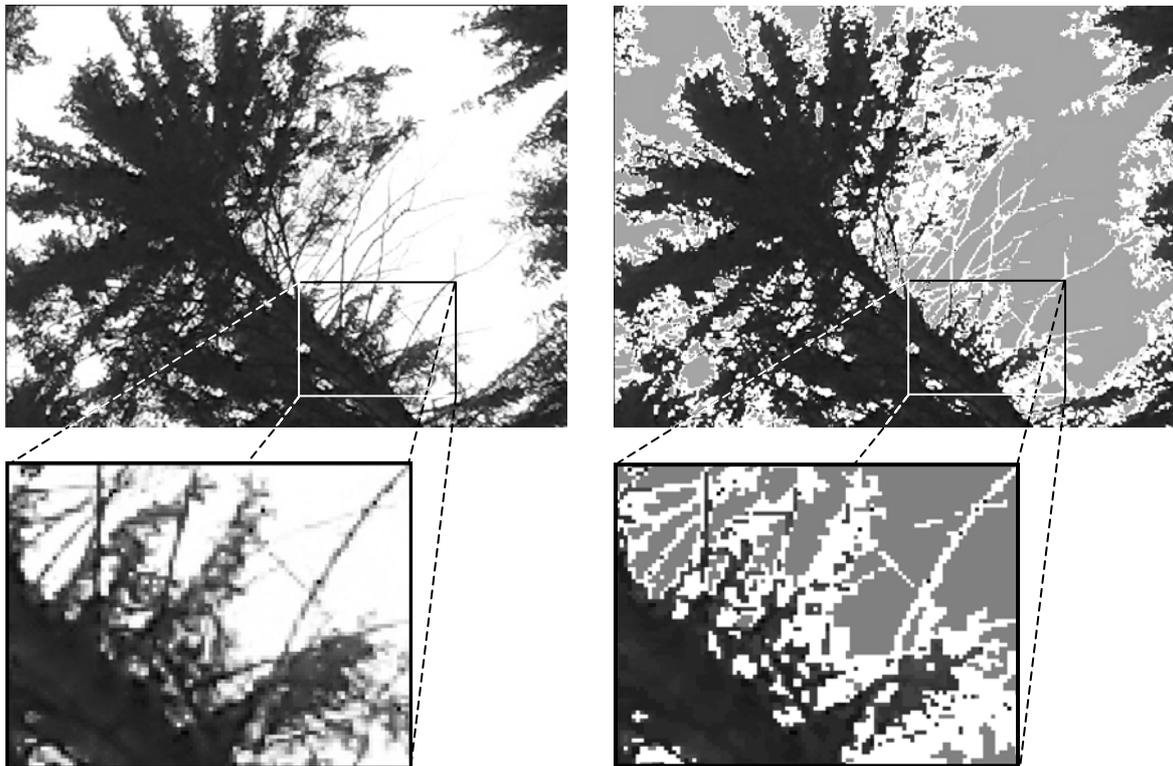


Abb. 4: Ausschnitt eines segmentierten Hemisphärenbildes im Vergleich mit dem Originalbild

5 Geometrische Modellierung

Neben der Segmentierung der Bilder erfolgt die Modellierung der geometrischen Abbildungseigenschaften des Fischaug-Objektivs. Das Ziel der Kalibrierung des Fischaug-Objektivs ist es die Möglichkeit zu schaffen, für ein segmentiertes Hemisphärenbild einen Raumbezug herstellen zu können. Der Raumbezug der Bilder soll realisiert werden, indem für die einzelnen Pixel sphärische Koordinaten bestimmt werden. Des Weiteren dient die Kalibrierung der Modellierung von systematischen Abweichungen, die z.B. durch Objektivverzeichnung und die Kameraparameter entstehen.

Die Besonderheit bei Aufnahmen mit einem Fischaug-Objektiv liegt in der Tatsache, dass es sich nicht um zentralperspektivische Abbildungen handelt und die Kollinearitätsgleichung somit nicht als Abbildungsfunktion verwendet werden kann. Die Fischaug-Projektion beruht idealerweise auf dem Prinzip, dass der Abstand eines Bildpunktes vom Bildhauptpunkt in linearer Abhängigkeit zum Winkel des einfallenden Strahles vom entsprechenden Objektpunkt steht.

Die Kalibrierung der Kamera erfolgt mittels Rückwärtsschnitt unter Verwendung eines Einzelbildes. Dazu wurde ein Kalibrierraum eingerichtet, der mit Punkten ausgestattet ist, deren 3D-Koordinaten bekannt sind (vgl. Abb. 5). Die Punkte wurden dabei so verteilt, dass sie sich im Hemisphärenbild auf konzentrischen Kreisen abbilden. Die Abstände benachbarter Punkte auf den jeweiligen Kreisen sind gleich. Damit wird eine formatfüllende und gleichmäßige Verteilung der Punkte über den Bildbereich gewährleistet. Als Marken wurden im mittleren Bildbereich Codemarken verwendet, im Randbereich des Bildes jedoch unkodierte Marken, da hier die Verzeichnung zu groß ist, um Codemarken auswerten zu können. Das noch zu implementierende mathematische Modell der Kalibrierung basiert auf einer Transformation

von Bildkoordinaten in sphärische Koordinaten und der Definition von Zusatzparametern zur Kompensation systematischer Abweichungen.

Ist die innere Orientierung der Kamera einschließlich der Verzeichnungsparameter bekannt, können die sphärischen Koordinaten der Pixel im Koordinatensystem der Kamera bestimmt werden. Für die Weiterverarbeitung der segmentierten Bilder ist es gegebenenfalls von Interesse, eine automatische Bestimmung der Orientierung des Sensors im Raum abzuleiten. Unter der Orientierung ist dabei die Bestimmung der Abweichung der Sensorebene von der Horizontalebene zu verstehen sowie die Einnordung des Sensors. Gegenwärtig erfolgt die Orientierung des Sensors unter Verwendung von Libellen und eines Kompasses.

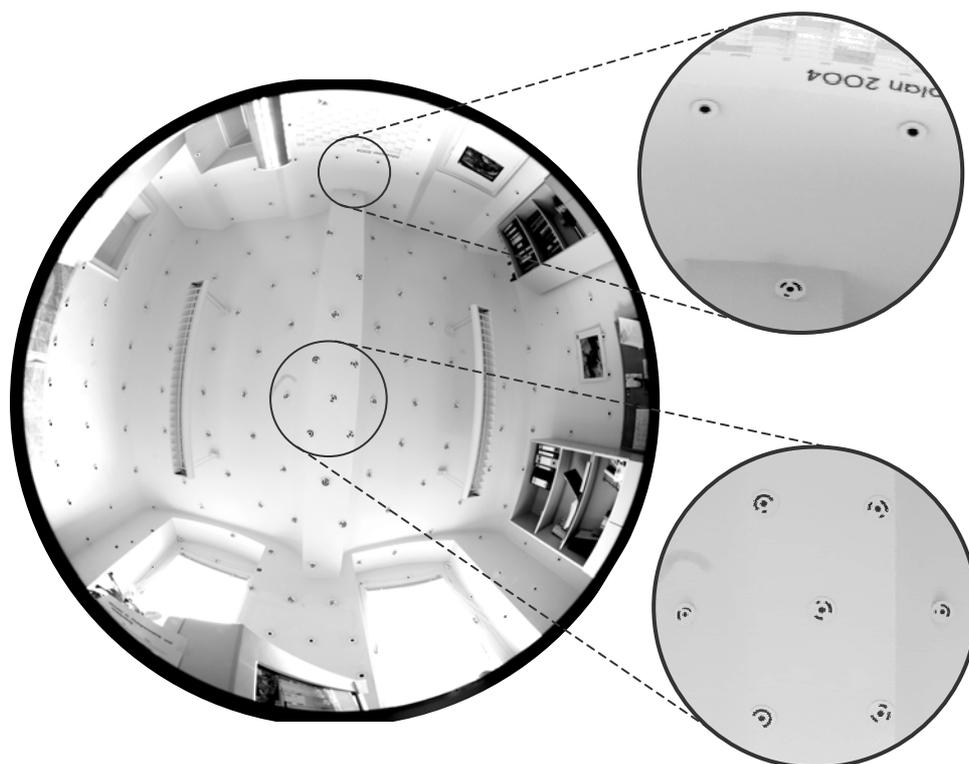


Abb. 5: Kalibrierraum

6 Resultate und Ausblick

Generell kann ausgesagt werden, dass die Ergebnisse der Klassifikation von Hemisphärenbildern mit kommerzieller Bildverarbeitungssoftware den gegebenen Genauigkeitsanforderungen noch nicht vollständig gerecht werden. ENVI bietet mehrere Möglichkeiten der überwachten Klassifizierung, welche aber alle hinsichtlich der Detailgenauigkeit und Zuverlässigkeit eingeschränkt sind. Da die Software für die Klassifizierung von Fernerkundungsdaten konzipiert ist, lassen sich die besonderen Eigenschaften der Hemisphärenbilder nicht umfassend genug berücksichtigen. Die Auswertung der Hemisphärenbilder mit eCognition bietet gute Segmentierungsergebnisse, ist aber in Bezug auf die Klassifikation ebenfalls durch die Tatsache eingeschränkt, dass die Klasse Himmel so vielfältige Eigenschaften besitzen kann. Daher wird ein eigenständiger, an diese Eigenschaften angepasster Segmentierungs- bzw. Klassifizierungsansatz zu entwickeln sein. Dieser sollte eine Adaptierbarkeit auf einzelne Wettersituationen und Waldarten ermöglichen, da jede Baumart und Wettersituation individuelle Segmentierungs- und Klassifizierungsparameter bedingt.

Die Erkenntnisse, die aus dem Versuch der Klassifizierung mittels kommerzieller Software gewonnen werden konnten, sind bei der Entwicklung eines angepassten Segmentierungsansatzes zu berücksichtigen. Es ist auch zu untersuchen, in wieweit die Ergebnisse der Klassifikation mittels Bildbearbeitungssoftware als Grundlage für eine verfeinernde Klassifikation verwendet werden können. Um die Helligkeitsunterschiede des Himmels im Bild zu kompensieren, ist die Einteilung des Bildes in einzelne Sektoren und die lokale Untersuchung derselben vorteilhaft. Mögliche Ansätze zur Segmentierung bzw. Klassifizierung sind die Verwendung eines *Region Growing* Algorithmus, einer automatischen und lokalen Schwellwertgenerierung mittels Histogrammanalyse sowie eine Klassifizierung auf Grauwertprofilen.

7 Danksagung

Die Arbeiten zu diesem Projekt werden von der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) gefördert (Forschungsprojekt: 170801/33). Weiterhin danken wir dem Institut für Waldbau und Forstschutz der Technischen Universität Dresden für die Zusammenarbeit in diesem Projekt.

8 Literaturverzeichnis

- EVANS, G.C., COOMBE, D.E., 1959: Hemispherical and woodland canopy photography and the light climate. - *Journal of Ecology*, Jg. 47, S. 103-113.
- DOHRENBUSCH, A., 1989: Die Anwendung fotografischer Verfahren zur Erfassung des Kronenschlußgrades. - *Forstarchiv*, Jg. 60, S. 151-155.
- LEUKERT, K., 2002: Untersuchungen zur Segmentierung von Satellitenbilddaten für die Extraktion von GIS-Objekten. - *Publikationen der DGPF*, Band 11, S. 237-244.
- WAGNER, S., 1998: Calibration of grey values of hemispherical photographs for image analysis. - *Agricultural and Forest Meteorology*, Jg. 90, Nr. 1/2, S. 103-117.

Ein Multiskalenansatz zur automatischen Ablesung von Wellenhöhen in Videobildern

BERND-MICHAEL STRAUB¹, MANFRED WIGGENHAGEN²

Zusammenfassung: In dem Beitrag wird ein im Rahmen eines Pilotprojektes für die Bundesanstalt für Wasserbau entwickeltes Verfahren zur automatischen Bestimmung von Wellenhöhen in Videobildern vorgestellt. Es soll eingesetzt werden, um die von Schiffen während der Durchfahrt von Schifffahrtsstrassen verursachten Wellenhöhen zu bestimmen. Aus den Ergebnissen der Messung der Wellenhöhe können Rückschlüsse auf die, durch das jeweilige Schiff verursachte, Erosion an den Ufern der Schifffahrtsstrasse gezogen werden. Für die Vermessung werden ins Wasser eingebrachte Messlatten (vergleichbar mit Nivellierlatten) benutzt, die während der Schiffsdurchfahrt mit einer Videokamera aufgenommen werden. Aufgabe der Bildanalyse ist es, den Wasserstand an der Messlatte zu verfolgen bzw. abzulesen. Die Strategie für die Ablesung des Wasserstandes ist in drei Phasen aufgeteilt. In einem ersten Schritt wird mithilfe eines Mustervergleichs die Position des Wasserstandes an der Messlatte grob bestimmt. Das Resultat der Grobmessung an der Latte wird genutzt, um den Suchbereich für die folgende Feinablesung einzuschränken. Die Feinmessung erfolgt durch die Analyse der zweiten Ableitung der Bildfunktion, die in verschiedenen Auflösungen untersucht wird. Nach einer kurzen Einleitung werden zunächst die Systemkomponenten, im wesentlichen die Messlatte und das Auswerteverfahren, beschrieben. Der Hauptteil des Beitrages behandelt die Strategie für die Ablesung der Wellenhöhe in den Bildern der Videosequenz.

1 Einleitung

Photogrammetrische Methoden werden schon seit längerem für die Bestimmung von Wellenoberflächen eingesetzt, in der Regel mit dem Ziel, die Wasseroberfläche in einem größeren Bereich zu erfassen (z.B. REDWEIK, 1993; TODD ET AL. 1997; SANTEL ET AL. 2004). In diesem Artikel wird ein System zur automatischen Ablesung der Wellenhöhe an einer Messlatte mit Methoden der digitalen Bildanalyse dargestellt. Die Ablesung der Wellenhöhe erfolgt durch die Analyse von Videobildern einer im Wasser stehenden Messlatte. Das für den mobilen Einsatz konzipierte Messsystem soll eingesetzt werden, um den Verlauf des Wellenganges während der Durchfahrt eines Schiffes mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung zu bestimmen.

Die wichtigsten Komponenten des Messsystems sind die Messlatten und die Algorithmen für die automatische Ablesung. Die Messlatten tragen die metrische Information, eine Kalibrierung der jeweils verwendeten Videokamera ist deswegen nicht notwendig. Die Strategie für die automatische Ablesung der Wellenhöhe an der Messlatte ist in drei Phasen eingeteilt:

Die erste Phase basiert auf einem Mustervergleich und hat das Ziel den Bereich für die Feinmessung grob festzulegen, hierzu werden Farbwechsel auf der rechten Hälfte der Messlatte verwendet (vgl. Abb. 2).

Die zweite Phase der Feinmessung erfolgt in einem Fenster auf der einfarbigen Seite der Messlatte durch eine Analyse der Grauwertoberfläche in mehreren Auflösungen, die durch Tiefpassfilterung des Originalsignals erzeugt werden.

¹ Bernd-Michael Straub, SOLVing3D, Husarenstraße 31, 30163 Hannover, E-mail: bernd-m.straub@solving3d.de

² Manfred Wiggenhagen, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover, Nienburger Straße 1, 30163 Hannover, E-Mail: wigge@ipi.uni-hannover.de

In der dritten Phase erfolgt die eigentliche Ablesung des Wasserstandes durch Interpolation zwischen zwei Farbwechsell. Im Rahmen der angestrebten Messgenauigkeit der Wellenhöhe an der Messlatte von 2-3 Zentimetern erübrigt sich damit eine nähere Betrachtung der Sensorgeometrie des Aufnahmesensors. Da die Ablesung direkt an der Teilung der Messlatte erfolgt, ist eine Kalibrierung des Sensors nicht notwendig.

Als Aufnahmesensor kann eine beliebige Videokamera eingesetzt werden, die mindestens VGA Auflösung liefert (640*480 Pixel). Zur besseren Ausnutzung des Bildformats wird die Kamera um 90° um ihre optische Achse rotiert. Das begrenzende Element ist dabei im wesentlichen die Länge der Messlatte (also der Messbereich) im Verhältnis zur Anzahl der vorhandenen Spalten. Die Länge der Messlatten beträgt 2.25 m, wobei die ersten 0.35 m nicht für die Auswertung herangezogen werden können. Daraus ergibt sich im praktischen Fall eine Auflösung von etwa 2-3 Pixel pro Zentimeter im Objektraum. Zur Verdeutlichung ist in Abb. 1 ein Ausschnitt eines Videobildes dargestellt. Das Bild zeigt im unteren Bereich eine für die ersten Versuche genutzte Messlatte während der Durchfahrt eines Schiffes. Über der „echten“ Latte ist eine für die automatische Auswertung modifizierte Messlatte in das Bild einmontiert, die zukünftig eingesetzt werden soll.

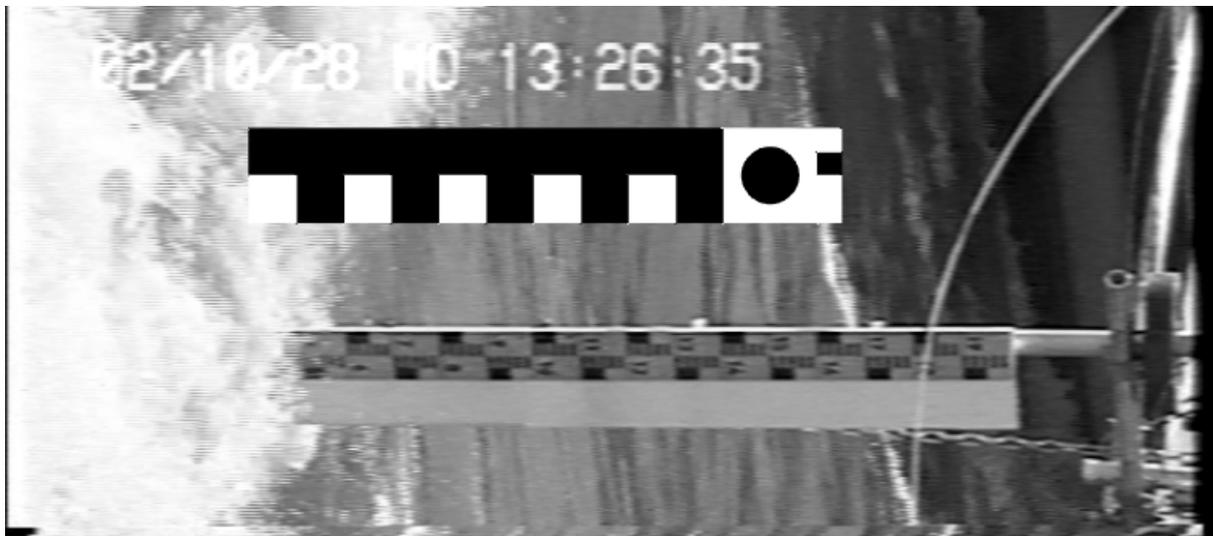


Abb. 1: Ausschnitt aus einem Vorversuch. Die untere Messlatte wurde wirklich aufgenommen, die obere wurde zu Testzwecken einmontiert.

2 Systemkomponenten

Die wichtigsten Komponenten des Systems, die Messlatten und die Strategie für die automatische Ablesung der Wellenhöhe, werden in diesem Abschnitt beschrieben.

2.1 Messlatten

Die von der Bundesanstalt für Wasserbau angefertigten Messlatten sind in drei Bereiche aufgeteilt (vgl. Abb. 2). Die Lattenköpfe sind jeweils mit kreisförmigen Marken zur Festlegung des Nullpunkts und einer einfachen 4bit Kodierung für die Identifikation der Messlatten ausgestattet. Die Latte ist 0.2 m breit, auf der rechten Hälfte ist eine Teilung in Form eines regelmäßigen Musters angebracht. Ein Element der Teilung besteht aus einem hellen und dem benachbarten dunklen Quadrat mit einer Seitenlänge von je 0.1 m. Die linke Hälfte der Latte ist einfarbig. Die in Abb. 2 erkennbaren dünnen schwarzen Linien dienen lediglich der Verdeutlichung in der Graphik. Auf den realen Messlatten werden diese Linien nicht aufgebracht.

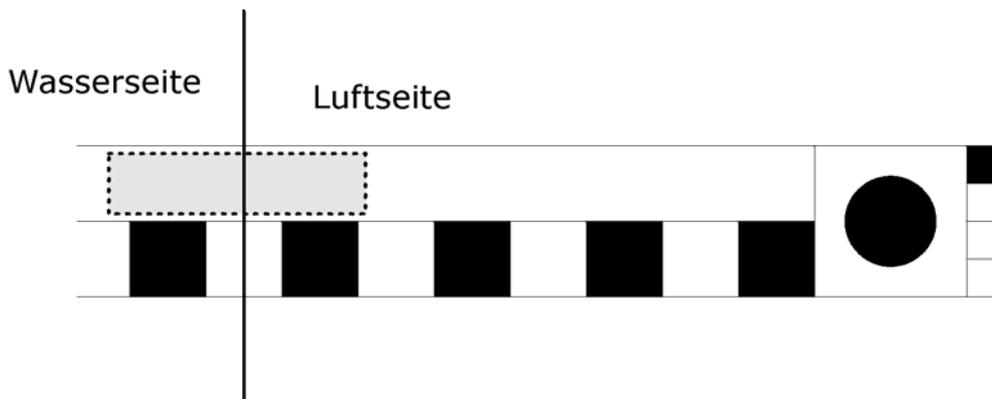


Abb. 2: Schematische Darstellung der Messlatte für die automatische Ablesung des Wasserstandes, aus Platzgründen ist die Messlatte „liegend“ abgebildet. Die Luftseite mit dem Lattenkopf ist rechts dargestellt, die Wasserseite (links von der vertikalen Linie) ist in den Aufnahmen nicht zu sehen. In Grau ist das (virtuelle) Fenster R für die Ablesung des Wasserstandes abgebildet, dieses Fenster ist kein Bestandteil der Messlatte, es markiert den Bereich in dem die Feinmessung durchgeführt wird.

Die rechte Seite der Latten ist auf der Vorderseite hell und auf der Rückseite dunkel. Die dunkle Seite wird genutzt, wenn die Latte während der Aufnahme von der Sonne beschienen wird, die dunkle entsprechend im Schatten. Abb. 2 zeigt die Vorderseite einer Messlatte, in Abb. 1 ist die Rückseite zu sehen.

2.2 Strategie für die Ablesung der Wellenhöhe

Die Kamera und die Messlatte bewegen sich während der Messung nicht bzw. nur so geringfügig, dass eine Nachführung (Tracking der Latte) im Rahmen der Bildanalyse nicht notwendig ist. Die Probleme bei der Ablesung des Wasserstandes bestehen vor allem darin, dass die Lichtverhältnisse während der Messung sehr stark variieren, und dass die Farbe der Wasseroberfläche nicht konstant ist. Beides wird vor allem durch das durchfahrende Schiff verursacht. Das Schiff verursacht Schatten und Reflexionen auf der Wasseroberfläche, dadurch ändern sich die Lichtverhältnisse. Bricht die Welle, dann wechselt die Farbe der Wasseroberfläche – wegen der Gischt – nach Weiß (vgl. auch Abb. 1).

Einen Überblick über den Ablauf der Messung gibt Abb. 22. Die einzelnen Phasen der Initialisierung, Grobmessung, Feinmessung und Interpolation werden in diesem Abschnitt detailliert beschrieben.



Abb. 3: Strategie für die Ablesung der Wellenhöhe

Die Initialisierung wird im ersten Bild der auszuwertenden Sequenz vom Operateur durchgeführt und dient dazu, Position, Größe und Orientierung der Messlatte in der Bildsequenz festzulegen. Die Grobmessung erfolgt mithilfe eines Mustervergleichs. Ziel dieses Schrittes ist es, möglichst zuverlässig festzulegen, wo das letzte vollständige Element der Teilung im aktuellen Bild zu sehen ist. Sie dient damit vor allem der Festlegung der ungefähren Position des Wasserstandes. Nachdem die ungefähre Position des Wasserstandes

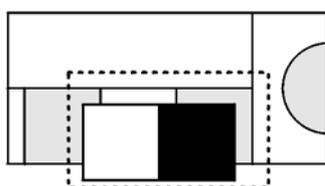
aus der Grobmessung bekannt ist, wird die Feinmessung zur genauen Bestimmung des Wasserstandes an der Messlatte durchgeführt. Die endgültige Ablesung auf der Teilung erfolgt durch Interpolation des Dreiecks, das von zwei Teilungspositionen und einem Punkt auf der einfarbigen Seite der Messlatte, dem Ergebnis der Feinmessung, aufgespannt wird.

2.2.1 Initialisierung

Jeweils zu Beginn einer auszuwertenden Sequenz muss jede abgebildete Messlatte von einem Operateur für die Messung initialisiert werden. Hierzu wird zunächst derjenige Bereich auf der einfarbigen Seite der Messlatte, durch den die Wasserlinie geht, mit einem Rechteck markiert. Als nächstes markiert der Operateur grob die runde Marke (Nullpunktmarkierung) am Lattenkopf. Die Messung von Zentrum und Radius der Marke erfolgen automatisch mit einem Schwerpunktoperator, der Radius wird aus der Fläche der Marke abgeleitet. Die weiteren Schritte der Initialisierung erfolgen, ebenso wie die gesamte weitere Messung, automatisch. Die rechte untere Ecke des Rechtecks und der Mittelpunkt der Nullpunktmarkierung dienen der Festlegung der ungefähren Orientierung der Messlatte im Bild. Der erste Farbwechsel unterhalb des Lattenkopfes wird im weiteren Verlauf der Prozessierung als Muster T nutzt. Die Anzahl der im ersten Bild der Sequenz sichtbaren Teilungsabschnitte wird für die Initialisierung vom Operateur abgefragt.

2.2.2 Grobmessung

Die Grobmessung besteht darin, das Muster T n -mal mit den entsprechenden Lattenabschnitten zu vergleichen. Durch die Initialisierung (Abschnitt 2.2.1) können die n Suchbereiche näherungsweise berechnet und positioniert werden, mit $n = 10$ bei einer 2 m langen Latte. Für jede Position wird das kleinste Ähnlichkeitsmaß $d_{r,c}$ (siehe Gleichung 1)



$$d_{r,c} = \frac{1}{uv} \sum_{u,v} |I_{r-u,c-v} - T_{u,v}| \quad (1)$$

Abb. 4: Schematische Darstellung des Mustervergleichs zur Grobmessung des Indexes auf der rechten Seite der Latte. Die linke Abbildung zeigt das Muster T (weiß-schwarz im Vordergrund) einen Ausschnitt des Bildes I (weiß-grau im Hintergrund). Der Suchbereich ist mit einer gestrichelten schwarzen Linie markiert.

innerhalb des Suchbereiches (vgl. Abb. 4) zwischen dem Bild I und dem Muster T berechnet und gespeichert. Aus dem Abstand zwischen der Wasserlinie und dem Lattenkopf aus der Initialisierung ergibt sich die Anzahl der nicht verdeckten Muster auf der Latte am Anfang der Messung. Da sowohl ablaufende, als auch auflaufende Wellen erfasst werden sollen, ist es vernünftig zu erwarten, dass die Messlatte zu Beginn der Messung etwa zur Hälfte sichtbar ist. Mittelwert $\overline{d_{r,c}}$ und Standardabweichung $s_{\overline{d_{r,c}}}$, der zu Beginn der Messung sichtbaren Teilungsabschnitte, werden für das erste Bild der Sequenz berechnet, und dienen im weiteren Verlauf der Messung als Schwellwert für die Grobmessung.

Für die Grobmessung wird, ausgehend vom Lattenkopf, das Muster T , solange nach unten verschoben, bis der aktuelle Wert für $d_{r,c}$ signifikant größer ist als $\overline{d_{r,c}}$ aus der Initialisierung. Über das Signifikanzniveau kann gesteuert werden, wie zuverlässig die Ergebnisse der Grobmessung sein sollen. Die Position $P_{T,i}$ des Zentrums von T , bei der $d_{r,c}$ am kleinsten ist,

wird als Messergebnis der Grobmessung gespeichert (vgl. auch Abb. 6). Im zeitlichen Verlauf der Messung wird dadurch die Teilung der Latte im Bildkoordinatensystem sukzessive bestimmt.

Als Ergebnis dieser Messung erhält man für jedes Bild der Sequenz die Position des letzten vollständig sichtbaren Segments auf der Luftseite. Diese Information wird genutzt, um das Fenster für die Feinmessung so zu positionieren, dass die Wasserlinie innerhalb des Fensters R liegt, vgl. Abb. 2. Die Teilung übernimmt damit zum einen die Aufgabe, den Bereich für die Feinmessung möglichst zuverlässig einzugrenzen, und zum anderen dienen die gemessenen Positionen während der Ablesung (siehe Abschnitt 2.2.4) der Interpolation des Ergebnisses der Feinmessung in den Lattenmaßstab im Objektraum.

2.2.3 Feinmessung

Die Feinmessung erfolgt innerhalb eines Fensters R , das mit Hilfe der Grobmessung an der ungefähren Position des Wasserstandes an der Messlatte positioniert wurde. Dieses Fenster R ist in der schematischen Darstellung der Messlatte in Abb. 2 mit dargestellt, ein typisches Bild des Übergangs zwischen Wasser und Luft zeigt Abb. 1. Der Verlauf der Extraktion des Wasserstandes innerhalb des Fensters ist der folgenden Abb. 5 für drei Beispiele aus einer Testsequenz dargestellt. In der oberen Reihe ist jeweils der Inhalt des Fensters R zu sehen, darunter jeweils die zweiten Ableitungen in unterschiedlichen Auflösungen im Linearen Maßstabsraum (LINDEBERG 1994) in Richtung der längeren Seite des Fensters. Die größte Auflösung ist in der zweiten Reihe von Abb. 5 dargestellt, darunter eine mittlere Auflösung, in der unteren Reihe die feinste Auflösung. Die unterschiedlichen Auflösungen des Originalsignals werden durch Faltung mit Gaußfunktionen mit jeweils halbierten σ erzeugt. Die größte Auflösung in Abb. 5 dargestellte Auflösung wurde mit einem σ von 5 pix erzeugt, die mittlere mit $\sigma=2$ pix. Je größer das σ , desto größer ist die Auflösung. Die punktierte Linie stellt dabei die endgültige Position des Wasserstandes dar, die sich durch Auswertung der feinsten Auflösung ($\sigma=1$ pix) ergab.

Dem Verfahren liegen zwei grundlegende Gedanken zugrunde. Zum einen, dass ein relevantes Merkmal sich in mehreren unterschiedlichen Auflösungen ausprägt, dies kann man in Abb. 5 gut bei den beiden links und mittig dargestellten Beispielen erkennen. Zum

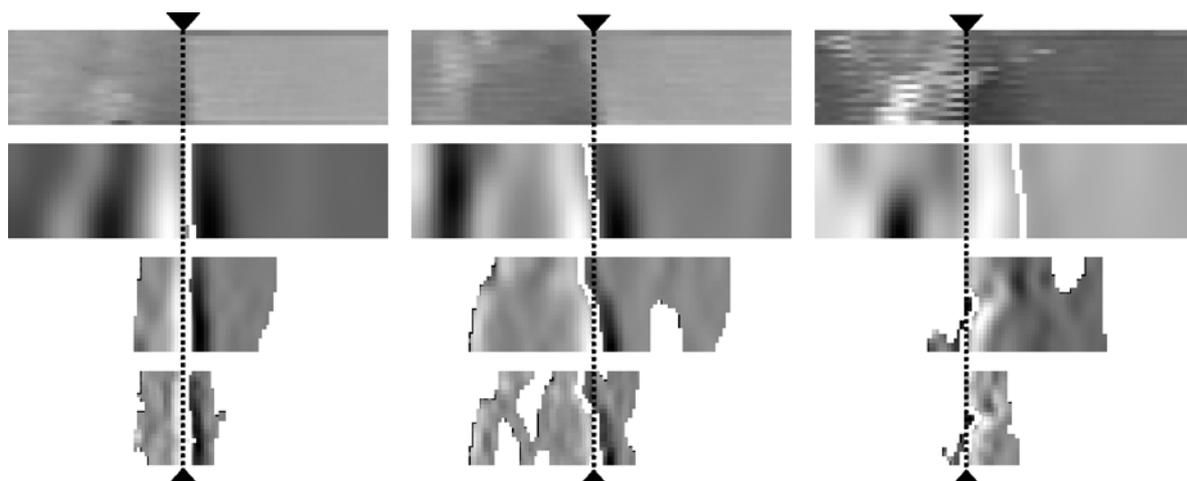


Abb. 5: Darstellung der einzelnen Schritte der Feinmessung innerhalb des Fensters.

anderen wird davon ausgegangen, dass der Wasserstand sich an derjenigen Stelle innerhalb des Fensters mit dem größten Kontrast befindet. Hierzu wird zunächst die zweite Ableitung in jeder verwendeten Auflösung berechnet. Anschließend wird das Bild in Regionen mit

positiven und Regionen mit negativen Werten segmentiert. Die beiden Regionen mit dem betragsmäßig höchsten Mittelwert werden ausgewählt und daraufhin untersucht, ob sie benachbart sind. Wenn sie benachbart sind, werden sie zu einer Region zusammengefasst, die wiederum den Suchbereich für die nächstfeinere Auflösung darstellt. Sind sie nicht benachbart, dann wird das Ergebnis als ungültig angesehen und zum nächsten Bild der Sequenz übergegangen. Die Linie zwischen den beiden benachbarten Regionen entspricht dem Wechsel zwischen Wasser und Luft. Hier wird die Linie durch eine Dilatation der Regionen und anschließender Bildung der Schnittmenge der beiden Regionen berechnet. Der Schwerpunkt S_F dieser Schnittmenge stellt das Ergebnis der Feinmessung dar (vgl. auch Abb. 6).

Mithilfe dieses Ansatzes, der außer einem Startwert für das σ der Gaußfunktion keine Schwellwerte benötigt, lässt sich der Wasserstand innerhalb des Fensters in den meisten Fällen bestimmen (vgl. auch die Beispiele in Abb. 5). Es soll noch erwähnt werden, dass der Parameter σ theoretisch keinerlei Auswirkung auf das Endergebnis hat, wenn er groß genug gewählt wurde. Lediglich die Rechenzeit steigt mit der Vergrößerung von σ . Der hier vorgestellte Ansatz wurde entwickelt, weil sich im Experiment zeigte, dass ansonsten sehr leistungsfähige Kantenextraktionsverfahren wie beispielsweise das in (DERICHE 1990) beschriebene, sich in den schwierigeren Fällen (vgl. Abb. 5 rechte Spalte) als recht schwer handhabbar herausstellten. Konkret heißt das, dass für gute Ergebnisse eine Anpassung der Parameter notwendig wurde. Allerdings führt auch der hier vorgeschlagene Ansatz nicht zwangsläufig zum Ziel, jedoch sind die Ergebnisse in den meisten Fällen – auch unter recht schwierigen Bedingungen – zufriedenstellend.

2.2.4 Ablesung

Die Ablesung des Wasserstandes auf der Messlatte erfolgt durch Interpolation zwischen den beiden Positionen des Musters T , die sich aus der Grobmessung ergeben haben. Da der jeweils untere der beiden Punkte $P_{T,i}$ und $P_{T,i+1}$ zum Zeitpunkt der Feinmessung nicht zu sehen ist, und die Ablesung des Wasserstandes möglichst durch eine Interpolation realisiert werden sollte, erfolgt die Ablesung erst, nachdem Grobmessung und Feinmessung für die gesamte Sequenz einmal vollständig durchgeführt wurden.

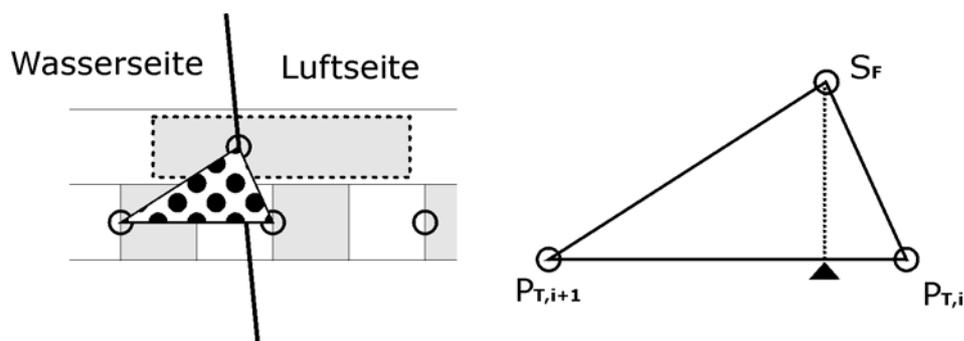


Abb. 6: Ablesung auf der Latte durch Interpolation in einem Dreieck, das durch zwei Positionen $P_{T,i}$ und $P_{T,i+1}$ aus der Messung des Grobmaßstabes und der Position der Feinmessung S_F aufgespannt wird.

Die Ablesung erfolgt durch die Berechnung des Lotfußpunktes von S_F (Ergebnis der Feinmessung) und den beiden nächstgelegenen Punkten $P_{T,i}$ und $P_{T,i+1}$ (Ergebnisse der Grobmessung) in dem von diesen drei Punkten aufgespannten Dreieck. Dieses Dreieck ist zur Verdeutlichung des Beschriebenen in Abb. 6 punktiert dargestellt. Die Abstände im Objektraum zwischen den Punkten $P_{T,i}$ und $P_{T,i+1}$ sind bekannt, die Distanz zwischen der

Nullpunktmarkierung und dem Ergebnis der Feinmessung (entsprechend dem schwarzen Dreieck in Abb. 6) kann damit berechnet werden.

3 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ein System zur automatischen Messung von Wellenhöhe vorgestellt. Das System besteht aus einer nicht kalibrierten Videokamera, Messlatten und der Software zur Auswertung. Die Messlatten werden in einen Fluss oder eine Schleuse eingebracht und während der Vorbeifahrt eines Schiffes oder Bootes mit der Videokamera aufgenommen. Die Auswertung der Aufnahmen erfolgt nach der Digitalisierung der Videosequenz auf einem mobilen Rechner. Die Messlatte ist in diesem Konzept alleiniger Träger der metrischen Information. Das hat den praktischen Vorteil, dass jede beliebige Videokamera benutzt werden kann und vor Ort keine Einschränkungen bezüglich der zu verwendenden Brennweite und Fokusposition der Kamera gemacht werden müssen.

Die Auswertung der Aufnahmen erfolgt nach einer manuell durchgeführten Initialisierungsphase im ersten Bild der auszuwertenden Sequenz in drei Phasen. Zunächst wird für die Grobmessung ein Mustervergleich durchgeführt. Als Mustermatrix wird das erste Element der Teilung der Messlatte verwendet. Ziel dieses Schrittes ist es, möglichst zuverlässig die ungefähre Position des Wasserstandes zu bestimmen. Im zweiten Schritt wird eine Feinmessung durch eine multiskalige Analyse der zweiten Ableitungen der Bildfunktion durchgeführt. Die endgültige Ablesung erfolgt durch Interpolation in dem Dreieck, das von zwei Teilungspositionen und einem Punkt auf der einfarbigen Seite der Messlatte, dem Ergebnis der Feinmessung gebildet wird.

Dank

Die Autoren möchten sich bei den Mitarbeitern der Abteilung Wasserbau im Binnenbereich der Bundesanstalt für Wasserbau für die wertvollen Anregungen und die gute Zusammenarbeit im Rahmen dieses Pilotprojektes bedanken. Dank an Prof. Bernhard Söhngen für die intensive Diskussion bezüglich der Strategie und an Andreas Orlovius für die vielen guten Hinweise bei der Konzeption der Messlatten.

4 Literatur

- REDWEIK, G., (1993): Untersuchungen zur Eignung der digitalen Bildzuordnung für die Ableitung von Seegangsparemtern, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 194, ISSN 0174-1454.
- SANTEL, F., LINDER, W., HEIPKE, C. (2004): Stereoscopic 3D-image Sequence Analysis of Sea Surfaces, XXth Congress of the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Istanbul (im Druck).
- HOLLAND, K. T.; HOLMAN, R.; LIPPMANN, T. C. (1997): Practical Use of Video Imagery in Nearshore Oceanographic Field Studies, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 22, No. 1, pp. 81-92.
- DERICHE, R. (1990): Fast Algorithms For Low-Level Vision. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* , 1 (12), pp. 78-87.
- LINDBERG, T. (1994). *Scale-Space Theory in Computer Vision*. Kluwer Academic Publishers, Boston, USA, 423 p.

Laserscanner in der As-Built Dokumentation

MATTHIAS KÄSER¹ & RALF REULKE²

Zusammenfassung: Der Beitrag befasst sich mit der dreidimensionalen Erfassung und Dokumentation von Industrieanlagen, wie sie nach der Planungs- und Bauphase existieren. Dieser neue Ansatz unterscheidet sich damit von einer Dokumentation, die allein auf der Planung basiert. Zusammen mit der Entwicklung der „Digitalen Fabrik“ gewinnt die As-Built-Dokumentation für die Betreiber von Großanlagen zunehmend an Bedeutung.

Daneben gibt es eine Reihe von technologischen Entwicklungen, welche die dazu notwendige Hard- und Software zur Verfügung stellen.

Es werden die Möglichkeiten, aber auch die Beschränkungen von Laserscannern und Auswertesoftware in der As-Built-Dokumentation untersucht. Im Mittelpunkt stehen dabei die Einflussfaktoren für die Genauigkeit und die Güte der Modellierung von Objekten.

1 Einleitung

Durch eine präzise und flächendeckende Aufnahme bieten 3D-Laserscanner dem Ingenieur eine Alternative zu bewährten Verfahren der Photogrammetrie und Tachymetrie, Objekte zu erfassen und darzustellen. Anwendungen finden sich u.a. im industriellen Umfeld. Hier sind schnelle und genaue Bestandsaufnahmen wünschenswert, welche den Produktionsablauf aus Kostengründen nur minimal unterbrechen und Grundlagen für Umbau- und Optimierungsplanungen liefern. Bisher liegen diese Unterlagen meist nur 2-dimensional vor. Durch den Einsatz von Laserscannern und geeigneter Software ist es nun möglich, Teile von Industrieanlagen oder gesamte Fabrikhallen 3-dimensional darzustellen. Dies ist die Grundlage für die „Digitale Fabrik“, welche es den Unternehmen ermöglichen soll, komplexe Produktionsabläufe zu simulieren, um somit eine optimale Produktivität des Unternehmens zu erreichen.

In dieser Arbeit sollte der Einsatz des 3D-Laserscanner IMAGER 5003 der Firma Zoller+Fröhlich GmbH in der As-Built Dokumentation untersucht werden. As-Built-Dokumentation bedeutet hier die 3D-Erfassung und die Dokumentation von Industrieanlagen, so wie sie erstellt wurden (HEILIGER 2002). Es wurde untersucht, welche Faktoren für die Genauigkeit der Modellierung von Objekten eine Rolle spielen. Das Hauptaugenmerk wurde dabei auf feste und nicht veränderbare Objekte gerichtet.

Dabei zeigte sich, dass verschiedene Einflussfaktoren zu berücksichtigen sind, welche die Genauigkeit des Ergebnisses beeinflussen können. Hierbei sind besonders die Materialeigenschaften der untersuchten Objekte aufzuführen. Sie sind, wie die Genauigkeitsuntersuchung zeigt, ausschlaggebend für das Rauschen und beeinflussen somit direkt die Modelliergenauigkeit. Außerdem sind sie maßgebend für das Reflexionsvermögen und damit für das gemessene Signal. Da dieser Laserscanner mit dem Phasendifferenzverfahren arbeitet, kann es bei Objekten mit geringem Reflexionsvermögen zu falschen Entfernungsmessungen kommen falls mehrfach reflektierte Signalanteile auftreten.

¹ Matthias Käser, Plüderhausen, e-mail: Matthias.Kaeser@gmx.de

² Prof. Dr. Ralf Reulke, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24D, 70174 Stuttgart/Germany, e-mail: Ralf.Reulke@ifp.uni-stuttgart.de

2 Laserscanner IMAGER 5003

Der Laserscanner IMAGER 5003 (Abb. 1) ist ein Panorama-Scanner, welcher bis zu 625000 Punkte pro Sekunde mittels Phasendifferenzverfahren aufnehmen und so eine schnelle und detaillierte Aufnahme der Umgebung durchführen kann.

Das Messsystem besteht aus zwei Elementen: einem punktuellen Laserradar und einer Steuereinheit. Das Laserradar ermöglicht eine Entfernungsmessung bis fast 60 m. Neben der Entfernung wird auch die Intensität des empfangenen Signals aufgezeichnet. Dieses eindimensionale Messsystem ist an eine zweifache Strahlableitvorrichtung gekoppelt.

Der Laserstrahl wird durch einen rotierenden Spiegel abgelenkt. Dabei bewegt sich dieser Spiegel bei einer schnellen Rotation um die horizontale Achse, langsam um die vertikale Achse, sodass dadurch eine sphärische Geometrie erfasst wird.

Die Amplitude des Signals ist Indikator für das Reflexionsvermögen des aufgenommenen Objekts. Da das Reflexionsvermögen materialabhängig ist, ist es über den Intensitätswert möglich, unterschiedliche Objekte zu identifizieren und zu klassifizieren.

Aus der pixelweisen Korrespondenz können die Messergebnisse als Entfernungsbild- oder Intensitätsbild (Abb. 2) oder kombiniert als 3-D-Punktwolke dargestellt werden [SMHG03].



Abb. 1: Laserscanner IMAGER 5003

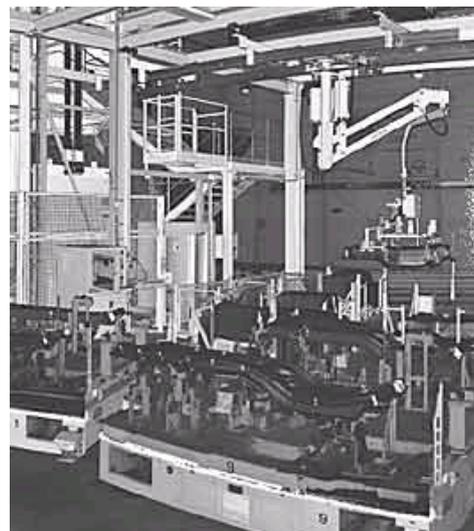


Abb. 2: Intensitätsbild

Die verwendete Trägerwellenlänge beträgt 780 nm und liegt somit im Bereich des sichtbaren Lichts. Auf dieses Signal werden zwei Phasen für Grob- und Feinmessung aufmodelliert.

Die laterale Auflösung ist entfernungsabhängig. Vor der Aufnahme kann aus unterschiedlichen Auflösungsstufen gewählt werden, wobei eine geringere Auflösung eine kürzere Scandauer zur Folge hat.

Der IMAGER 5003 wird in zwei Variationen mit unterschiedlichem Eindeutigkeitsbereich hergestellt. Abhängig von System und Eindeutigkeitsbereich, differieren sie außer in der Laserleistung, auch im Linearitätsfehler, Temperaturdrift und Strahldivergenz.

Die Software Light Form Modeller der Firma Zoller+Fröhlich dient der Weiterverarbeitung der aufgenommenen Laserscans. Sie ermöglicht die Modellierung von Objekten aus einer 3-D Punktwolke in ein 3-D CAD-Modell (SMHG03, ZOLLER+FRÖHLICH 2002).

3 As-Built Dokumentation

Vor der Aufnahme mit dem Laserscanner ist es nötig, ein ausgeglichenes, lokales Festpunktfeld zu schaffen, um die unterschiedlichen Scans nach den Aufnahmen in ein gemeinsames Koordinatensystem transformieren zu können (Abb.3).

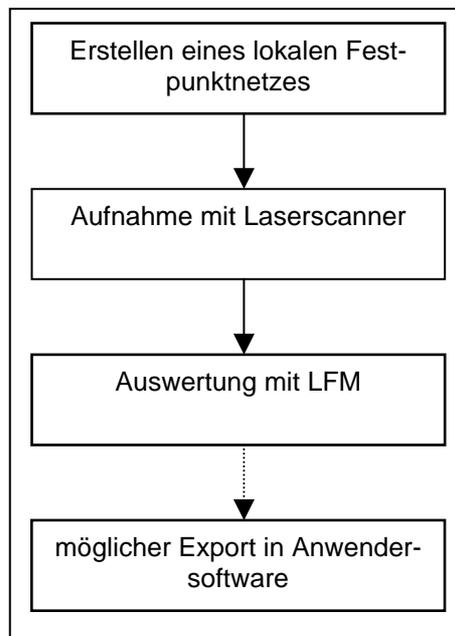


Abb. 3: Ablaufdiagramm

Um Mehraufwand zu vermeiden, ist es sinnvoll, die geeigneten Standpunkte für den Laserscanner im Vorfeld der Messung festzulegen. Kriterien sind dabei die vorliegenden örtlichen Gegebenheiten und der gewählte Eindeutigkeitsbereich. Daraufhin werden die zur Referenzierung nötigen Passmarken innerhalb des Scannbereichs angebracht und durch Tachymeteraufnahme im Zielsystem bestimmt.

Bevor eine Auswertung und Modellierung durchgeführt werden kann, müssen die Daten in ein geeignetes Format konvertiert werden. Nach der anschließenden Registrierung bzw. Orientierung der einzelnen Scans, können die Aufnahmen ausgewertet und die gewünschten Objekte u.a. mithilfe der Software *Light Form Modeller* modelliert werden. Anschließend bietet diese Software die Möglichkeit, die modellierten Elemente in verschiedenen Formaten zu exportieren. Die modellierten 3D – Elemente stehen in einer *.sat - Datei zur Verfügung. Außerdem besteht die Möglichkeit diese im dxf -, VRML - oder STL – Format zu exportieren.

4 Ergebnisse

In den Untersuchungen haben sich verschiedene Faktoren, die die Modellierbarkeit von Objekten beeinflussen, herauskristallisiert. Es zeigte sich, dass neben der gewählten Auflösung, der Aufnahmerichtung und der Objektform, insbesondere das Reflexionsvermögen für die Modellierbarkeit von Objekten ausschlaggebend ist.

Sehr gut sind Elemente mit hohem Reflexionsvermögen aus den Aufnahmen zu extrahieren. Diese sind für den Auswerter aufgrund des im Vergleich zu Objekten mit hohem Reflexionsvermögen wie z.B. Metall- und Stahlelementen geringen Anteils an Rauschen leicht zu extrahieren und zu modellieren. Beispiel hierfür sind Betonelemente wie Säulen und Träger. Als problematisch stellt sich die Modellierung von schwach reflektierenden Objekten heraus. Zum einen macht der große Anteil an Rauschen es schwieriger, die gewünschten Punkte zu extrahieren, was zur Folge hat, dass die Modelliergenauigkeit geringer wird. Zum anderen machen sich Einflüsse von Mehrfachreflektionen von stark reflektierende auf schwach reflektierende Objekte, die sich in deren unmittelbaren Umgebung befinden, bemerkbar, was sogar soweit gehen kann, dass eine Modellierung unmöglich ist. Diese Fehler rühren daher, dass diese Objekte den Großteil des einfallenden Signals nicht lambertsch sondern spiegelnd reflektieren (Abb. 4).

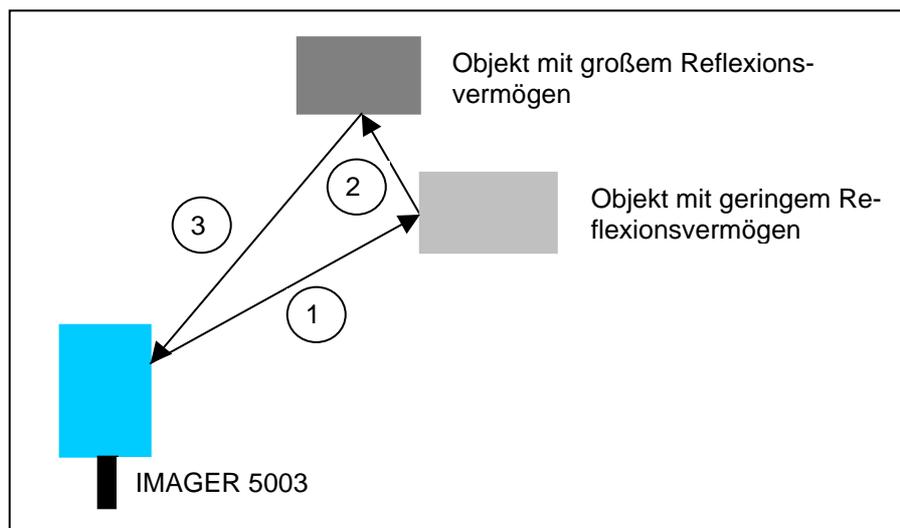


Abb. 4: Problem bei Objekten mit geringem Reflexionsvermögen

So wird das Signal (1) größtenteils nicht direkt an den Laserscanner reflektiert, sondern an dahinter liegende Objekte weitergeleitet (2). Werden von diesem Objekt Teile des Signals an den Scanner reflektiert (3). So erhält der Empfänger zwei unterschiedliche Phaseninformationen, die zusammengefasst zu einer falschen Entfernungsbestimmung führen.

Der Modellierbarkeit ist durch die gewählte Auflösung bei der Aufnahme Grenzen gesetzt. So können, abhängig von der Auflösung, kleine Objekte nicht mehr aus den Punktwolken extrahiert werden und somit nicht im 3D-Modell dargestellt werden.

Auch die Objektform spielt für die Modellierbarkeit des einzelnen Objekts eine Rolle. Elemente, die sich durch vorgegebenen Grundprimitive bestangepasst aus der Punktwolke extrahieren lassen, sind unter Berücksichtigung der anderen schon genannten Faktoren gut und meist genau genug zu modellieren.

Des Weiteren kann es vorkommen, dass Objekten, aufgrund von Abschattungen nicht komplett aus der Punktwolke modelliert werden können. Für die Modellierung müssen daher a-priori Kenntnisse über ihre geometrischen Maße bekannt sein. Diese Maße können durch Handaufmaß, Abgreifen aus dem Grauwertbild oder durch die Berechnung eines Schnitts durch die Punktwolke des darzustellenden Objekts bestimmt werden, was zusätzliche Unsicherheiten und einen zusätzlichen Aufwand zur Folge hat.

Bei Objekten, die nicht durch geometrische Grundprimitive approximiert werden können, muss schon bei der Aufnahme darauf geachtet werden, dass diese von allen Seiten aufgenommen werden und so vollständig in der Punktwolke vorhanden sind. Diese Objekte können nur dann durch Vermaschung im 3-D Modell dargestellt werden.

Wie sich in der Auswertung der Laserscans deutlich gezeigt hat, ist auch die Orientierung ein wesentlich die Genauigkeit limitierender Faktor. Um eine gute Orientierung der einzelnen Scans zueinander zu erreichen, ist es wichtig, die Passmarken dort anzubringen, wo Elemente ausgewertet werden sollen.

Als letzter Punkt ist noch die Aufnahme-richtung aufzuführen. Je schiefender der Auftreffwinkel des Laserstrahls auf dem Objekt ist, umso ungenauer wird die Messung. Der Auftreffwinkel kann auch die fehlerhaften Messungen an schwach reflektierenden Objekten minimieren. Wenn der Strahl möglichst senkrecht auf das Objekt trifft, ist die Gefahr einer Spiegelung am Objekt geringer.

Um die Genauigkeit der Modellierung zu steigern, können fast alle aufgeführten Parameter minimiert werden. Der Laserscanner IMAGER 5003 bietet unterschiedliche Einstellungen für das Scannen an. Durch eine andere höhere Auflösung können kleinere Objekte besser modelliert werden. Die Verringerung der Aufnahmegeschwindigkeit führt zu einer Minimierung des Rauschens. Bei Aufnahmen von zusätzlichen Standpunkten, können Probleme von Abschattungen beseitigt werden und durch eine nähere Aufnahme, die Auflösung von kleinen Objekten erhöht und somit deren Modellierbarkeit verbessert werden. Probleme bei der Orientierung der Scans, können durch zusätzliche Passpunkte, die besser im Raum verteilt werden, minimiert werden. Wenn besonders ausgedehnte Elemente modelliert werden sollen, ist die Wahl eines größeren Eindeutigkeitsbereichs vorzuschlagen.

Diese Faktoren lassen sich somit durch ein geeignetes Messkonzept beeinflussen. Jedoch die Probleme bei Objekten mit geringem Reflexionsvermögen sind nicht zu minimieren. Hier muss eine technische Weiterentwicklung stattfinden, um auch diese Objekte sinnvoll modellieren zu können

Keiner der angesprochenen Einflüsse vollständig zu eliminieren. Dies hat zur Folge, dass der Planung vor der Messung eine wichtige Rolle zukommt. Um die Rentabilität zu sichern, ist es unbedingt nötig, sich schon im Vorfeld der Aufnahme über diese Faktoren im Klaren zu sein, um so die richtigen Gegenmaßnahmen zur Erfüllung der Anforderungen, die an das Ergebnis gestellt sind, durchzuführen.

Allgemein sollten nach der Aufnahme die Scans auf Vollständigkeit, besonders in komplexen Situationen, untersucht werden. Außerdem sollten kritische Elemente, wie z.B. schwach reflektierende, wenn sie für die Modellierung von Interesse sind, mit Sorgfalt geprüft werden und diese notfalls zusätzlich aus einer anderen Richtung aufgenommen werden. Dieser zusätzliche Zeitaufwand für Kontrolle und Zusatzaufnahmen direkt nach der Aufnahme rechnet sich mit Sicherheit, da so Nachmessungen und Unsicherheiten beim Modellieren verhindert werden können.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Gegenüber konventionellen Verfahren weist der IMAGER 5003 deutliche Vorteile auf. Durch die kurzen Aufnahmezeiten müssen mögliche Arbeiten in den aufzunehmenden Räumen, wenn überhaupt, nur kurz unterbrochen werden. Außerdem bieten die Scans eine Informationsfülle, die mit photogrammetrischen Aufnahmen vergleichbar ist.

Es ist unzweifelhaft, dass für einen rentablen Einsatz von Laserscannern in der As-Built-Dokumentation Erfahrung notwendig ist. Es zeigt sich, dass eine gute Planung im Vorfeld der eigentlichen Aufnahme notwendig ist, um sowohl die gewünschten Genauigkeiten, als auch

eine reibungslose Auswertung erreichen zu können. Dann sind unter Berücksichtigung der erwähnten Einflüsse, Genauigkeiten von besser als 3 cm erreichbar, was für die Ansprüche an die As-Built-Dokumentation ausreichend ist.

So ist der Einsatz von Laserscanning in der As-Built-Dokumentation auf jeden Fall empfehlenswert. Diese Technologie wird sicherlich neben den etablierten Verfahren bestehen. Der heutige Stand des sehr jungen Laserscannings ist schon jetzt sehr vielversprechend und es wird interessant sein, die zukünftigen Entwicklungen zu verfolgen.

6 Literaturverzeichnis

HEILIGER, R., 2002: PHOTOGRAMMETRIE UND LASER-SCANNING. - DER VERMESSUNGSINGENIEUR, 2002 (2).

HEINZ, I., METTENLEITER, M., FRÖHLICH, C., STEPHAN, A., 2002: HOCHGESCHWINGIGKEITSLASERSCANNER IMAGER 5003 FÜR AS-BUILT-DOKUMENTATION. IN LUHMANN, T. (HRSG.): PHOTOGRAMMETRIE UND LASERSCANNING. WICHMANN VERLAG, HEIDELBERG 2002, S.74-83

ZOLLER+FRÖHLICH GMBH, 2002: BEDIENUNGSANLEITUNG LASER SYSTEM IMAGER 5003. WANGEN I.A.

INTERNET: WWW.ZF-LASER.COM. ZOLLER+FRÖHLICH GMBH, MAI 2003

Aktualisierung der Geodaten eines LBS unter Einbeziehung der Nutzer

FLORIAN SAYDA¹, WOLFGANG REINHARDT¹

Zusammenfassung: Location Based Services (LBS) finden eine immer größere Verbreitung, auch auf dem Massenmarkt. Einer ihrer wichtigsten Bestandteile sind die Daten, auf denen die verschiedenen Dienste basieren. In diesem Beitrag wird ein Ansatz zur Einbeziehung der Nutzer eines LBS bei der Aktualisierung des zugrunde liegenden Datenbestands am Beispiel eines LBS für Bergwanderer aufgezeigt. Neben der geometrischen Verarbeitung der von den Nutzern gelieferten Datenbestände, wird auch auf die Problematik der Zuverlässigkeit dieser Daten eingegangen. Der vorgestellte Ansatz soll es dem Betreiber eines LBS ermöglichen, die derzeit hohen Kosten für Erfassung und Fortführung von Geodaten zu reduzieren.

1 Einleitung

Zahlreiche Studien der vergangenen Jahre, wie beispielsweise LADSTÄTTER(2002), prognostizieren dem Bereich des Mobilfunks für positionsbezogene Dienste (*Location Based Services – LBS*) ein hohes Wachstumspotential. Bereits heute bieten zahlreiche Mobilfunkbetreiber und Drittanbieter ortsbezogene Dienste an, die beispielsweise die klassische Anfrage „Wo befindet sich der/die/das nächste ... (z.B. Restaurant)?“ beantworten. Obwohl der große Durchbruch dieser Dienste auf dem Massenmarkt noch nicht erfolgt ist, wird weiterhin davon ausgegangen, dass dies in den nächsten Jahren erfolgen wird, so auch in der Studie ANDERSEN (2002). In dieser werden die Möglichkeiten, die digitale Informationen für globale mobile Dienste bieten, untersucht. Um diesen viel versprechenden Markt zu stimulieren, werden ebenfalls in dieser Studie, folgende 7 Faktoren als wesentlich identifiziert:

- Verfügbarkeit des erforderlichen Inhalts
- Verfügbarkeit relevanter Applikationen
- Bewusstsein der Nutzer für die Vorteile/Nutzen des „mobilen Inhaltes“ (mobile content)
- Entwicklung entsprechender mobiler Endgeräte
- Schaffen eines für die an den Diensten Beteiligten attraktiven Wirtschaftssystems, zum Beispiel durch eine entsprechende Gewinnverteilung zwischen den Beteiligten, Stimulierung von Investitionen in alle benötigten Technologien (z.B. durch Förderprogramme) oder auch der Förderung der Eindeutigkeit und Interoperabilität von Standards in diesen Bereichen.

Als erster Faktor wird hier die Verfügbarkeit des erforderlichen Inhalts genannt, bei einem LBS also die zu Grunde liegenden Daten. In übertragenem Sinne wird ein Nutzer nur dann bereit sein, einen Dienst regelmäßig zu nutzen, wenn die angebotenen Informationen richtig und aktuell sind. Somit entsteht für den Betreiber eines LBS ein nicht unerheblicher Aufwand für die Beschaffung und laufende Aktualisierung der Daten.

¹ Dipl.-Ing. Florian Sayda, florian.sayda@unibw-muenchen.de
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Reinhardt, wolfgang.reinhardt@unibw-muenchen.de, beide Arbeitsgemeinschaft GIS (AGIS), Universität der Bundeswehr München, 85577 Neubiberg,

Eine Möglichkeit den Betreiber eines LBS bei der Aktualisierung der Daten zu unterstützen ist die Nutzer in diesen Prozess einzubinden. Dies kann auf zwei Arten erfolgen. Zum einen kann versucht werden, Informationen aus dem Verhalten der Nutzer zu gewinnen. Diese Verfahren werden momentan zum Beispiel bei der Verkehrslenkung von Fahrzeugen getestet. In dem in FRAUNHOFER (2002) beschriebenen Projekt werden aktuelle Positionsinformationen von Testfahrzeugen ausgewertet um hieraus Informationen über den momentanen Verkehrsfluss abzuleiten. Eine zweite Möglichkeit ist, den Nutzer aktiv in die Datengewinnung und Aktualisierung einzubinden. Die Möglichkeit wird im folgenden näher betrachtet und an Hand eines Prototypen eines LBS für Bergwanderer (PARAMOUNT) untersucht.

2 PARAMOUNT – positionsbezogene Dienste für Bergwanderer

PARAMOUNT ist ein Prototyp eines LBS für Bergsteiger und Bergwanderer und wurde von der EU im 5ten IST-Rahmenprogramm (Contract N° IST-2000-30158) gefördert. Das Projekt wurde von folgenden Partnern durchgeführt:

- IfEN GmbH, Poing
- AGIS UniBW München
- ICC, Institut Cartogràfic de Catalunya, Barcelona
- Bergwacht Bayern
- Österreichischer Bergrettungsdienst

Ziel des Projektes war es, einen positionsbezogenen Dienst für Bergwanderer auf Prototypbasis zu entwickeln und zu testen. Dieser stellt dem Nutzer einerseits eine Reihe von Informationen bereit, andererseits soll er die Sicherheit des Bergwanderers erhöhen. Hierzu gehören die Bereitstellung von Karten, Darstellung der Position in dieser, sowie folgende weitere Funktionen:

- Verschiedene Routing-Funktionen, zum Beispiel zu einem gewählten Ziel oder zu nächsten Schutzhütte
- Abruf und Darstellung von Points of Interest (POIs), zum Beispiel Hütten, Gipfel, Bergbahnen, ...
- Aktuelle Informationen zu POIs, zum Beispiel Öffnungszeiten, Telefonnummern, Webseiten ...
- Abruf von regionalen Informationen, zum Beispiel Wetterinformationen oder touristisch relevanten Informationen
- Abrufen einer dreidimensionalen Darstellung der Umgebung des Nutzers zur leichteren Orientierung
- Absetzen eines Notrufes mit der entsprechenden Position

Des Weiteren werden die Rettungskräfte durch die SAFETOUR-Dienste während der Rettungseinsätze, zum Beispiel durch die Möglichkeit einen Notruf mit Positionsangabe zu empfangen, unterstützt. Zum anderen steht den Bergwachen im Rettungseinsatz eine mobile Komponente und ein Tool in der Einsatzleitzentrale zur Verfügung. In letzterem wird dem Einsatzleiter zum Beispiel das Einsatzgebiet in 2D und 3D dargestellt, aber auch die Position des Verunfallten und der Rettungsteams vor Ort.

Um all diese Funktionalitäten und Dienste zu realisieren, bedarf es eines umfassenden und aktuellen Datenbestandes. In PARAMOUNT werden hierfür folgende Daten verwendet:

- Topographische Karten, Raster und Vektor

- Wegenetz (Vektoren), z.B. Strassen, Wanderwege, ...
- Points of Interest (POI) als Vektoren
- Digitales Geländemodell für die dreidimensionale Darstellung
- Sachinformationen zu den POIs

Neben den ‚Geo-DB‘, die die zuletzt genannten Daten verwaltet, existieren noch zwei weitere Datenbanken. Eine für die Dienste von SAFETOUR, welche Informationen zu den Nutzern, Informationen zu SAR (Search and Rescue) -Einsätzen sowie eingehende Notrufe verwaltet. Eine weitere dient zur Zwischenspeicherung der von den Nutzern an DATATOUR übermittelten Informationen.

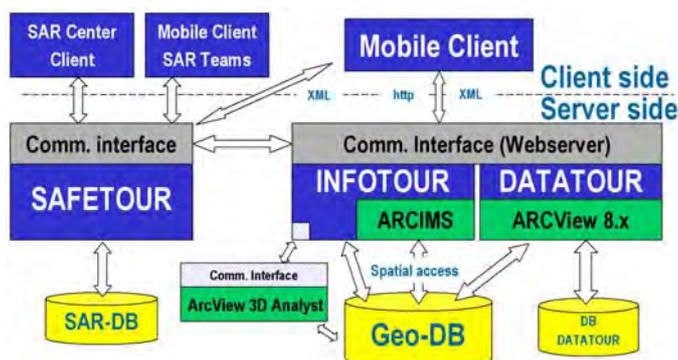


Abb. 1: PARAMOUNT Systemarchitektur

Zum mobilen Zugriff auf die Dienste und Informationen kann auf der Hardwareseite ein Standard-‚Pocket PC‘ verwendet werden, der mit geeigneten, handelsüblichen Komponenten zur Navigation und Datenkommunikation erweitert wird. Die Benutzeroberfläche ist in Abb. 2 dargestellt.



Abb. 2: TourGuide Software / Standarddarstellung



Abb. 3: PARAMOUNT im Testbetrieb

Ziel der DATATOUR Dienste ist es, den Nutzer in eine effiziente Erfassung und Aktualisierung des zugrunde liegenden Datenbestandes (Geo-DB) mit einzubeziehen. Auf die damit verbundene Fragestellung der Zuverlässigkeit von Nutzern sowie den von diesen gelieferten Daten wird nachfolgend näher eingegangen.

Die prototypisch implementierten PARAMOUNT-Dienste wurden in einem Zeitraum von Juli bis September 2003 in intensiven Feldversuchen mit den Bergwachten und mit Bergstei-

gern / Wanderern sowohl in den Alpen als auch den Pyrenäen in Testgebieten mit einer Größe von jeweils ca. 900 km² erfolgreich getestet. Bei den Feldversuchen bestätigten die Testpersonen den Diensten, die sich an Bergsteiger und Wanderer richten, gute Eignung für Zwecke der Information, der Orientierung und der Navigation, sowie die einfache Handhabung des Systems aus Nutzersicht. Während der Tests mit Mitgliedern der Bergwacht Bayern und des Österreichischen Bergrettungsdienst wurde bestätigt, dass die Verwendung von SAFE-TOUR zur Beschleunigung eines Einsatzes führen kann.

Das Forschungsprojekt wurde im November 2003 erfolgreich abgeschlossen. Weitere Informationen sind unter www.paramount-tours.com oder entsprechenden Publikationen zu finden (siehe zum Beispiel REINHARDT ET AL. (2003)).

2.1. Aktualisierung von Geodaten eines LBS am Beispiel von Wanderwegen

Es gibt verschiedenste Positionierungsverfahren, die auch für die Erfassung von Daten im Bereich der LBS genutzt werden können. Aussagen zu den erreichbaren Positionierungsgenauigkeiten der einzelnen Verfahren sind in der Literatur zum Beispiel in CASPARY (2002), MISRA ET AL. (2001), WEBER ET AL. (2003), AITENBICHLER (2003), INGENSAND ET AL. (2001) und RETSCHER (2002) zu finden. Für die hier vorgestellte Erfassung der Wanderwege zeigt sich, dass Satellitennavigationsverfahren am besten geeignet sind. So sind bereits sehr viele Wanderer und Bergsteiger mit GPS-Geräten im Gebirge unterwegs. Der mobile Client in PARAMOUNT verwendet ebenfalls GPS zur Positionsbestimmung. Deshalb liegt es nahe diese von den Wanderern aufgezeichnete Information (vor allem Wanderwege) zu nutzen. Ziel des hier vorgestellten Verfahrens ist die automatische Auswertung dieser Daten. Auf weitere Fragen, wie die Authentifizierung der Nutzer, deren Registrierung etc. soll in diesem Artikel nicht eingegangen werden. Die in diesem Artikel gezeigten Ergebnisse verwenden als Grundlage Daten aus sogenannten „Handheld“ GPS-Empfängern, deren Positionsgenauigkeit günstigstenfalls im Rahmen von ca. 15 Metern liegt, sofern das Signal nicht durch externe Einflüsse, wie beispielsweise Abschattungen, behindert wird. Die Positionsgenauigkeit der GPS-Empfänger liegt im übrigen ungefähr in der gleichen Größenordnung wie die erzielbare Genauigkeit einer manuellen Digitalisierung aus einer Wanderkarte im Maßstab 1: 50 000 und ist für die hier verfolgten Ziele ausreichend.

Das vorgeschlagene Verfahren gliedert sich in drei wesentliche Schritte. Im ersten werden die Daten durch die Nutzer erfasst und an einen zentralen Server zur Speicherung und weiteren Auswertung übermittelt. Dies kann zum Beispiel durch Übermittlung von Protokolldateien, die vom Nutzer gegangene Wege in Form von Koordinatenlisten enthalten, geschehen. Die Zwischenspeicherung ist notwendig um zu verhindern, dass die Daten direkt ohne Kontrolle in die Datenbank übernommen werden. Generell stellt sich bei einem solchen Verfahren die Frage: Wie kann die Zuverlässigkeit der von den Nutzern gelieferten Daten geprüft/verifiziert werden?

Ziel ist es, im zweiten Schritt, automatische Verfahren einzusetzen um aus den von einer Vielzahl von Nutzern gelieferten Daten relevante und zuverlässige Informationen, die in die Datenbank übernommen werden können, abzuleiten. In einem dritten Schritt werden diese Vorschläge einer Qualitätskontrolle unterzogen und in die Datenbank übernommen. Dies kann zum Beispiel durch eine visuelle Kontrolle oder automatische Verfahren beim Einfügen in die Datenbank geschehen.

Im Weiteren wird speziell auf die Problematiken die sich im zweiten Schritt ergeben eingegangen. Folgende Einflüsse auf die gelieferten Daten sind hier zu berücksichtigen:

- Fehler in den übermittelten Daten durch Übertragungsfehler, dies kann z.B. in fehlenden oder fehlerhaften Wegpunkten resultieren:
Zur Übermittlung von Daten zwischen Computersystemen existieren bereits viele erprobte und zuverlässige Methoden. Innerhalb des Projektes PARAMOUNT wurden die Daten mittels http an den Server übertragen. Es wird vorausgesetzt, dass die im weiteren verwendeten Daten keine durch die Übermittlung hervorgerufenen Fehler, enthalten.
- Grobe Fehler in den Daten (Ausreißer), verursacht zum Beispiel durch Abschattung des GPS-Signals:
Im weiteren wird davon ausgegangen, dass die Daten von solchen Fehlern bereinigt wurden. Auf Verfahren wie diese überprüft und festgestellte Unstimmigkeiten beseitigt werden können, wird hier nicht weiter eingegangen, sind aber zum Beispiel in GEISLER (2002) zu finden.
- Der Nutzer bewegt sich teilweise oder vollständig abseits der Wege - Ein Nutzer versucht eventuell absichtlich falsche Daten in das System zu bringen. Dies führt zu der generellen Fragestellung: Kann den Daten des Nutzers vertraut werden? Diese Problematik wird im Folgenden als „Zuverlässigkeit der Nutzer“ bezeichnet und in Kapitel 2.1.2 näher untersucht.

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass eine größere Anzahl von Nutzern Ihre aufgenommenen Wege lieferten, die alle eine ähnliche geometrische Genauigkeit aufweisen und in einem Vorverarbeitungsschritt von den im vorhergehenden beschriebenen groben Fehlern bereinigt wurden (SAYDA ET AL. (2003)). Weiter wird der Grundsatz eingeführt, dass kein Wegstück in den Datenbestand übernommen wird, das nicht von mindestens zwei Nutzern unabhängig - im Rahmen der zu erwartenden Genauigkeit – identisch geliefert wurde. Hierzu ist ein Verfahren zu entwickeln, das identische Wegstücke in den gelieferten Daten auffindet und vereinigt. Dieses Verfahren wird im folgenden kurz skizziert.

2.1.1. Geometrische Auswertung der Daten

Zunächst werden hierzu jeweils paarweise zwei Datensätze betrachtet. Diese sind entweder direkt von Nutzern gelieferte Wegstücke oder bereits aus dem hier beschriebenen Algorithmus berechnete neue Wegstücke. Innerhalb eines Toleranzbereichs werden zwischen diesen Datensätzen übereinstimmende Wegstücke gesucht. Werden zwei solche, im folgenden als Ausgangswegstücke bezeichneten Teile von Datensätzen gefunden, kann daraus ein neues Wegstück „gemittelt“ werden. Das geometrische Verfahren, das hier Anwendung findet ist in SAYDA ET AL. (2003) näher beschrieben und soll hier nicht näher betrachtet werden. Einige Ergebnisse dieses Algorithmus sind in Abb. 4 zu finden.

Der Algorithmus erlaubt auch eine geometrische Gewichtung der beiden Ausgangswegstücke. Hierüber lässt sich die Lage des berechneten Wegstückes zwischen den beiden Ausgangswegstücken steuern. Benötigt wird dies zum Beispiel im Fall, dass eines der Ausgangswegstücke A (Gewicht w_A , $w_A > 1$) ein bereits aus mehreren Datensätzen generiertes Wegstücke ist und das andere Ausgangswegstück B (Gewicht $w_B=1$) direkt von einem Nutzer geliefert wurde. Das in diesem Beispiel berechnete Wegstück kommt mittels der Gewichtung somit näher an A zu liegen.

Zu beachten ist, dass in die geometrische Gewichtung der Wege nicht die Zuverlässigkeit der Nutzer eingeht, sondern diese rein auf der Anzahl der Wegstücke die vorher zum jeweiligen Ausgangswegstück vereinigt wurden basiert. Mit anderen Worten, die geometrische Genauigkeit der gelieferten Daten an sich, ist unabhängig von der Zuverlässigkeit des Nutzers und erhöht sich so mit zunehmender Anzahl an Nutzern, die Daten zu diesem Wegstück beitragen.

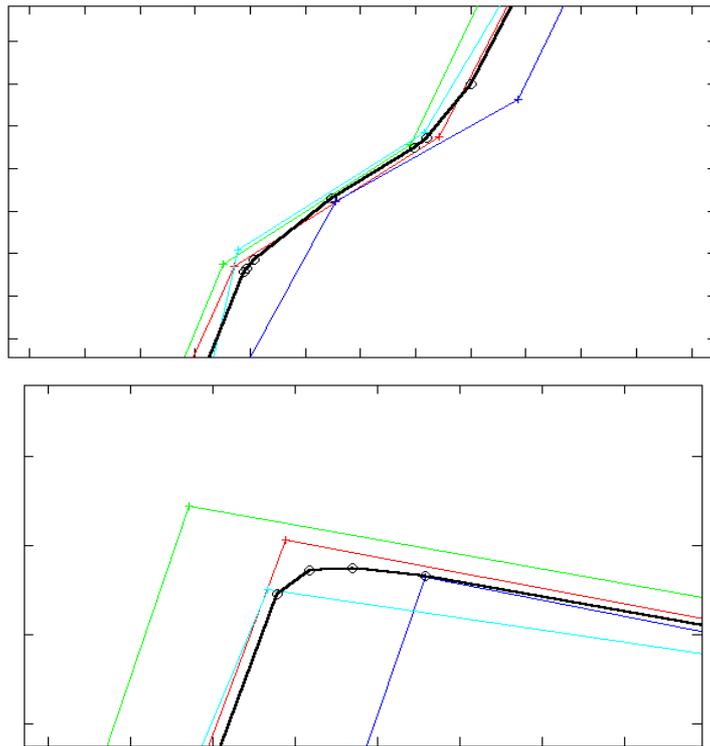


Abb. 4: Ergebnis (Schwarz) aus 4 gleichgewichteten Wegen (Zyan, Rot, Blau, Grün) in einem gemeinsamen Teilstück

Weiterhin soll den berechneten Wegstücken ein Zuverlässigkeitswert zugewiesen werden. Dieser wird benutzt, um Aussagen machen zu können, inwieweit Daten zuverlässiger Nutzer in die Berechnung dieses Wegstückes eingegangen sind. Berechnet wird die Zuverlässigkeit des neuen Wegstückes ausgehend von der Zuverlässigkeit der Nutzer, die die Ausgangswegstücke für dieses geliefert haben. Handelt es sich bei einem oder beiden Ausgangswegstücke um bereits berechnete Wegstücke wird dementsprechend deren Zuverlässigkeitswert für die Berechnung herangezogen. Die Berechnung sollte derart erfolgen, dass sich der Wert für die Zuverlässigkeit eines Wegstückes erhöht, je mehr Daten unterschiedlicher Nutzer zu diesem beigetragen haben. Wird schließlich ein festgesetzter Zuverlässigkeitswert (Schwellwert) für ein berechnetes Wegstück überschritten, wird dieses zur Übernahme in die Datenbank des LBS vorgeschlagen. Über diesen Schwellwert lässt sich auch der zuvor eingeführte Grundsatz, dass kein Wegstück in den Datenbestand übernommen wird, das nicht von mindestens zwei Nutzern unabhängig geliefert wurde, steuern. Wie dies algorithmisch realisiert werden kann, ist zum Zeitpunkt der Entstehung dieses Beitrags (Juni 2004), noch Gegenstand weiterer Forschungen.

Nachdem ein neues Wegstück berechnet und dessen Zuverlässigkeit bestimmt wurde, werden abschließend die Zuverlässigkeiten der Nutzer, die die Ausgangswegstücke geliefert haben, wie im Folgenden beschrieben, aktualisiert.

2.1.2. Modellierung der Nutzerzuverlässigkeit

Ziel ist es, dass sich die Zuverlässigkeit eines Nutzers erhöht, falls dieser mit einem Ausgangswegstück zu einem berechneten Wegstück, wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben, beiträgt. Vertrauen in die von Nutzern gelieferten Daten durch das System ist hier ein wichtiger Punkt, den es zu berücksichtigen gilt. Ziel ist es, das Konzept des Vertrauens, ähnlich zu dem aus dem sozialen Umfeld bekannten, zu verwenden, um ein Maß für die Zuverlässigkeit des Nutzers hinsichtlich der von ihm gelieferten Daten zu geben. Zum Beispiel sollte, den Daten ei-

nes Nutzers, der schon häufig „richtige“ Daten geliefert hat, vom System mehr vertraut werden, als den Daten eines neuen Nutzers. Dies wird innerhalb des vorgestellten Verfahrens über die Zuverlässigkeit des Nutzers gesteuert. Anwendung finden ähnliche Konzepte zum Beispiel bereits in online Marktplätzen, Foren und online communities. Praktische Beispiele für diese, auch Reputationsmechanismen genannten Verfahren, finden sich unter anderem beim online Auktionshauses ebay oder dem ESRI userform.

Die Zuverlässigkeit der Nutzer, die in die Zuverlässigkeit der berechneten Wegestücke ein- geht, sollte unter Berücksichtigung folgender Parameter modelliert werden:

- Der Länge des Weges zu dem der Nutzer ein Ausgangswegstück geliefert hat.
- Der Zuverlässigkeit des anderen Ausgangswegstückes, d.h. wird ein Ausgangswegstück eines Nutzers mit einem als sehr zuverlässig eingestuften Ausgangswegstück vereinigt, sollte die Steigerung seiner Zuverlässigkeit größer ausfallen, als bei der Vereinigung mit einem Ausgangswegstück geringerer Zuverlässigkeit.
- Der eigenen Zuverlässigkeit des Nutzers, d.h. die Veränderung der Zuverlässigkeit eines Nutzers mit hoher Zuverlässigkeit fällt geringer aus, als die eines Nutzers mit geringer Zuverlässigkeit, wenn beide zu einem Wegstücke mit gleicher Zuverlässigkeit beitragen.
- Die Zuverlässigkeit eines Nutzers darf einen Maximalwert nicht übersteigen.

Einige der hier genannten Voraussetzungen an die Modellierung der Zuverlässigkeit der Nutzer finden sich auch in der Literatur, zum Beispiel in ZACHARIA (2000), als allgemeine Anforderungen an Bewertungsverfahren in IT-Systemen. Ein entsprechender Algorithmus kann zu diesem Zeitpunkt noch nicht präsentiert werden, da er ebenfalls noch Gegenstand weiterer Forschungen ist. In einem ersten Schritt wurde mit einem einfachen linearen Modell für die Zuverlässigkeit der Nutzer gearbeitet.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Wie am Anfang dieses Artikels gezeigt wurde, spielen Geodaten eine zentrale Rolle im Bereich der Location Based Services. Ein wesentliches Problem in diesem Zusammenhang ist die effektive Erfassung und Aktualisierung dieser Daten. Wie der in diesem Artikel vorgestellte Anwendungsfall zeigt, kann die automatische Auswertung der von Nutzern gelieferten Daten einen Beitrag hierzu leisten. Das einfache lineare Modell für die Zuverlässigkeit der Nutzer hat in ersten Tests zusammen mit der geometrischen Auswertung der Wanderwege schon viel versprechende Ergebnisse geliefert. In den weiteren Forschungen soll in einem nächsten Schritt die Modellierung der Nutzerzuverlässigkeit an Hand der in Abschnitt 2.1.2 aufgestellten Kriterien verfeinert und getestet werden. Weiterhin gilt es zu untersuchen ob und gegebenenfalls wie der momentan noch empirisch ermittelt Schwellwert für die Zuverlässigkeit eines berechneten Wegstückes, der ausschlaggebend für dessen Übernahme in die Datenbank ist, bestimmt werden kann.

4 Literaturverzeichnis

AITENBICHLER, E.: Ortungssysteme für mobile Endgeräte. In: Proceedings zu GI Jahrestagung (1) 2003, 202-206

- ANDERSEN: Digital Content for Global Mobile Services. Final Report. European Commission Directorate-General Information Society, Februar 2002.
- CASPARY, W.: Kinematische Messmethoden. In: ZFV-Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement 127 (2002), Nr. 5, S 281-290
- FRAUNHOFER INSTITUT IPK (Hrsg.): City- FCD : Autos liefern Staudaten für intelligente, http://www.innovations-report.de/html/berichte/verkehr_logistik/bericht-10117.html zuletzt besucht am 01.06.2004
- GEISLER, B.: Zur automatischen Generierung von Wegen aus GPS-Messungen, unveröffentlichte Diplomarbeit, Studiengang Geodäsie und Geoinformation, Universität der Bundeswehr München, 2002
- INGENSAND, H. & BIZI, P.: Technologien der GSM-Positionierungsverfahren. Allgemeine Vermessungsnachrichten, Heft 8-9, Seite 286-294, 2001
- LADSTÄTTER, P.: Location Based Services: Bloßer Hype oder reale Wertschöpfung? In: Kelnhofer, F. & Lechthaler, M.: Telekartographie & Locations Based Services, Geowissenschaftliche Mitteilungen, Heft Nr. 58, 2002, S 41-58.
- MISRA, P. & ENGE, P.: Global Positioning System. Lincoln, Massachusetts: Ganga Jamuna Press, 2001
- REINHARDT, W., SAYDA, F., KANDAWASVIKA A., WANG, F. & MUNDLE, H.: Geoinformation und mobile Dienste – Anforderungen und Anwendungen für Bergsteiger und Wanderer. In Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation 6/2003, S. 463-469, DGPF/Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- RETSCHER, G.: Diskussion der Leistungsmerkmale von Systemen zur Positionsbestimmung mit Mobiltelefonen als Basis für Location Based Services (LBS). In: TeleKartographie & Location Based Services, Geowissenschaftliche Mitteilungen Heft Nr. 58, Wien, 2002
- SAYDA, F., GEISLER, B. & REINHARDT, W.: Aktualisierung von Datenbeständen am Beispiel eines positionsbezogenen GI-Dienstes für Bergsteiger und Wanderer. In: 12 Inspages 135-141
- WEBER, T., STROBL, K. & SCHÄFER, C.: Das Europäische Satellitennavigationssystem Galileo – Status und Systemdefiniton. Im Tagungsband zum 5. SAPOS Symposium, Frankfurt, November, 2003
- ZACHARIA, G. & MAES, P.: Trust Management Through Reputation Mechanisms. Applied Artificial Intelligence, 14, Seite 881-907, Taylor & Francis, 2000

Ein mobiles Navigations- und Informationssystem für Wanderer

CHRISTIAN STERN¹

Zusammenfassung: Gemeinsam mit der Stadt Oberkirch wurde an der Fachhochschule Karlsruhe – Hochschule für Technik im Rahmen einer Diplomarbeit ein Prototyp eines Wandernavigationssystem entwickelt, mit dem hauptsächlich die Zielgruppe „junge Erwachsene“ zum Wandern in der Freizeitregion rund um die Stadt animiert werden soll. In einem ersten Schritt wurden die Anforderungen an solch ein System erarbeitet, im nächsten Schritt folgten die Beschaffung der Hardware und die Programmierung des Systems. Dabei musste ein besonderes Augenmerk auf die Aufbereitung der Geodaten speziell für die Anforderungen eines mobilen Endgeräts gelegt werden. Schließlich wurde der Prototyp mit verschiedenen ortsbezogenen Diensten entwickelt, nochmals leicht überarbeitet und der Öffentlichkeit vorgestellt. Seither werden die Geräte bei der Stadt Oberkirch in einer recht hohen Frequenz entliehen und erfreuen sich einer positiven Resonanz.

1. Einleitung

Navigationssysteme haben in der letzten Zeit, vor allem in der Automobilbranche, sehr an Bedeutung gewonnen. Häufig sind die „Geräte mit der freundlichen Stimme“, die einen auf möglichst schnellem Wege zum Ziel lotsen, beim Neukauf eines Autos standardmäßig eingebaut. Selbst in Discountermärkten kann man inzwischen in halbjährlichem Rhythmus Navigationssysteme für das Auto preisgünstig erwerben. Sie haben also Zugang zum Massenmarkt gefunden.

Doch der Mensch bewegt sich nicht nur im Auto durch den Raum. Ist er einmal an seinem Ziel angekommen, so verlässt er seinen Wagen und geht z.B. zu Fuß weiter. Wie wird er aber bei dieser Fortbewegungsart zu seinem Ziel geleitet? Bis in die vergangenen Jahre diente die Karte auf Papier zum Planen von Routen und zum Zurechtfinden im Gelände. Heute, im Zeitalter von Mobiltelefon, Personal Digital Assistant (PDA) und Global Positioning System (GPS) sind diese mobilen Endgeräte dabei, dem Nutzer das Studium der Karte und das Lesen des Reiseführers abzunehmen, ihm eine geeignete Route vorzuschlagen und mit ortsbezogenen Informationen zu beliefern.

Das touristische Potenzial dieser Geräte wurde von Seiten der Stadt Oberkirch, einer Gemeinde in der Ortenau, am Fuße des mittleren Schwarzwalds, erkannt. Touristisch bekannt ist der Ort im Renchtal vor allem wegen des Weines. Man wirbt aber auch mit Kultur, Gastronomie, den Möglichkeiten der Freizeitgestaltung für Wanderer, Radfahrer und Naturfreunde und der Nähe zur französischen Metropole Straßburg.

Daher lag es nahe, dass man eine der ersten Städte sein wollte, die solch ein Navigationssystem für Wanderer anbietet, um das damit verbundene Echo in den Medien zu nutzen und den Bekanntheitsgrad der Stadt weiter zu steigern. Mit der Zielgruppe junge Erwachsene und Familien ist die Hoffnung verbunden, das Wandern und damit den Aufenthalt in Oberkirch auch für diesen Teil der Gesellschaft interessant zu machen.

Mit diesen Vorstellungen wurde von Seiten der Stadt ein geeigneter Projektpartner gesucht, der sich bei der Erstellung eines Prototyps des „Wandernavigationssystems“ mit seinem Know-how beteiligen könnte. Im Fachbereich Geoinformationswesen der Fachhochschule Karlsruhe – Hochschule für Technik fand man schließlich den geeigneten Partner und vereinbarte eine Kooperation im Rahmen einer Diplomarbeit, die von Prof. Dr.-Ing. Schweinfurth betreut wurde. Von Seiten der Stadt Oberkirch waren die Tourist-Information und das Tiefbauamt am Projekt beteiligt, und als privater Partner das Weinhaus Renner in Oberkirch. Von den ersten Kontakten der Kooperationspartner im Spätjahr 2002 über die Fertigstellung der Diplomarbeit im Frühjahr 2003 bis zur Vorstellung des Systems der Presse am 10. September 2003 sollte fast ein Jahr vergehen.

2. Konzeption

Im ersten Schritt wurde von der Stadt Oberkirch die Idee vorgestellt: man wollte ein satellitengesteuertes Navigationssystem, das Wanderer spielend per PDA durch Oberkirch führt und gleichzeitig Informationen und Hinweise gibt. Das System sollte ein Verirren des Wanderers unmöglich machen, althergebrachte Wanderführer ersetzen und junges Publikum zum Wandern animieren.

Es wurde vereinbart, im Rahmen der Diplomarbeit, die Galip Agacik, Student im Studiengang Kartographie und Geomatik an der Fachhochschule Karlsruhe – Hochschule für Technik übernehmen sollte, zunächst einen Prototyp zu erstellen. Dieser sollte zwei Routen enthalten: eine kleine Route durch die Stadt, vorbei an den verschiedenen Sehenswürdigkeiten, die

Oberkirch zu bieten hat, und eine kleine Wanderung durch die Weinberge und Wälder der Stadt, die dort auch als „Weinwanderung“ bekannt ist.

Gefordert wurde von dem System, dass der Wanderer an wichtigen Wegpunkten die Information bekommt wo er als nächstes weitergehen muss. Dazu wurden Fotos mit einer Digitalkamera aufgenommen, in denen mit deutlich sichtbaren Pfeilen die Wegrichtung markiert werden sollte, um diese dann durch ein Popup-Fenster im geeigneten Augenblick anzeigen zu lassen. Zusätzlich sollte das Wandernavigationssystem an den Sehenswürdigkeiten der Stadt oder anderen touristisch interessanten Orten ein Informationsfenster mit Bild öffnen, in dem man die Beschreibung zum Objekt lesen oder auf Wunsch auch hören können sollte.

Ein Routing zwischen bestimmten Punkten in der Stadt oder ein freies Bewegen außerhalb der vorgegebenen Wanderrouten wurde zunächst nicht vorgesehen.

Die Diplomarbeit sollte mit den Mitteln und in den Räumlichkeiten des Fachbereichs Geoinformationswesen der Fachhochschule Karlsruhe – Hochschule für Technik durchgeführt werden. Konkret sollte man die benötigte Hard- und Software zur Programmierung des Systems liefern und durch das vorhandene Know-how die Arbeit betreuen. Die Stadt Oberkirch versprach, die notwendigen Geodaten, Bilder und Informationen zusammenzutragen und bereitzustellen.

3. Umsetzung

Von Seiten des Tiefbauamtes der Stadt Oberkirch wurden zunächst die notwendigen Geometrien aus der Automatisierten Liegenschaftskarte (ALK) in Form von ESRI Shapefiles geliefert, zusätzlich übergab man Orthobilder und einen Stadtplan als Rasterdaten. Die Tourist-Information trug digitale Fotos sowie Texte und Beschreibung in gedruckter Form bei.

Für die Diplomarbeit wurden ein PDA und ein in einen Kletterhelm integriertes GPS-Gerät beschafft. Die Schnittstelle zwischen den Geräten musste von dem mit der Beschaffung der Geräte beauftragten Ingenieurbüro Wohlfeil selbst gebaut werden, da von Seiten der Industrie zu diesem Zeitpunkt für das Projekt in Frage kommenden Gesamtlösungen zu einem annehmbaren Preis noch nicht angeboten wurden.

So wurde ein Compaq iPAQ Pocket PC H3800, bestückt mit einem 206 MHz INTEL Strong ARM Prozessor und 64 MB SDRAM Hauptspeicher und dem Betriebssystem Microsoft Pocket PC 2002 beschafft. Als GPS-Empfänger wurde ein Empfänger für differentielles GPS (DGPS/LW-Box) gekauft, der in den Kletterhelm eingebaut wurde. Hierbei handelte es sich um einen Zwölf-Kanal-Empfänger, der ALF-Korrekturdaten empfängt und dessen Genauigkeit im Dezimeterbereich liegt. Das Tragen des Helms erwies sich auf längere Dauer als unangenehm, da alleine der Empfänger schon ein Gewicht von 480 Gramm hatte. Deshalb – und wegen des Aussehens – war schon zu Beginn der Arbeit klar, dass es sich bei dieser Kombination nur um einen Prototypen handeln konnte, nicht aber um das fertige System, mit dem man Touristen und Wanderer auf Tour schicken konnte.



Abb. 1: Diplomand mit Prototyp des Wandernavigationssystems

Für die Programmierung der Software wurde eine Entwicklungsumgebung auf Basis von ESRI Software verwendet: ArcPad 6.0.2 als anzupassende Applikation für das mobile Endgerät, ArcPad Application Builder (ArcStudio 6.0.1) als Programmierumgebung (VBScript), sowie die Geoinformationssysteme ArcGIS 8.3 ArcInfo Desktop, ArcView GIS 3.3 und ERDAS Imagine 8.5 für die Datenaufbereitung.

Zunächst stand die Konzeption des Systems und die Aufbereitung der Daten im Vordergrund. Als Grundlage des Systems sollte die ALK dienen, da allein diese Daten die hohe Genauigkeit aufweisen, die für ein großmaßstäbiges Wandernavigationssystem gefordert wird. Zudem sind inhaltlich alle wesentlichen markanten Orientierungsmerkmale (Gebäude, topographische Objekte) und Nutzungsarten enthalten, so dass sich die ALK dadurch als Kartengrundlage bzw. Hintergrundgraphik eignet. Ein weiterer Punkt für die Verwendung der ALK ist,

dass vielen Nutzern die Orientierung auf einem farblich gut gestalteten Kartenhintergrund leichter fällt als auf Luftbildern oder Grautonbildern.

Für eine optimale Wiedergabe der ALK auf dem Display des PDA in einer hinreichend kurzen Zeit für den Bildaufbau musste somit die graphische Gestaltung und das Datenvolumen für die Verwendung auf dem PDA angepasst werden (vgl. AGACIK, 2003, S.17).

AGACIK (2003) stellte für seinen Prototyp fest, dass für eine Orientierung mit dem PDA und eine gute Führung durch das GPS die Darstellung von Gebäuden, Flurstücken und Nutzflächen vollkommen ausreichend ist. Auch in diesen Datenebenen mussten unnötige Attribute entfernt werden, um weiteren Speicherplatz freizugeben. Um die Hintergrundkarte gut lesbar zu gestalten, reduziert AGACIK (2003) die Zahl der Farben durch eine „Umklassifizierung“ von Objekten. So werden z.B. Gartenland, Grünland, usw. zu einer gemeinsamen Nutzfläche farblich zusammengefasst. Ähnlich geht er bei den wichtigsten Wegmarken für die Orientierung, den Gebäuden, vor. Eine Unterscheidung zwischen öffentlichen und sonstigen Gebäuden empfindet er als zweckmäßig, weshalb er eine Umklassifizierung von Haupt-, Neben- und sonstigen Gebäuden in die Objektart „sonstige Gebäude“ vornimmt (AGACIK, 2003, S.18).

Wegen der relativ kleinen Speicherkapazität des PDA ist es nicht möglich, Rasterdaten im gebräuchlichen TIFF-Format zu verwenden. Diese mussten in das MrSID-Format konvertiert werden, das Rasterdaten relativ verlustfrei mit hohen Kompressionsraten speichern kann. Der als Rasterbild vorliegende Stadtplan musste zuvor noch georeferenziert werden.

Die Grundlage der Navigation bildet die in Liniengeometrie vorliegende Wanderroute, sowie zugehörige Weginformationpunkte und Sehenswürdigkeiten, die als Punktgeometrien abgespeichert wurden. Zum Wanderweg und zu den Sehenswürdigkeiten gehören jeweils noch verschiedene flächenhaft vorliegende „Pufferzonen“, die zur Überprüfung der aktuellen Position und zum Start verschiedener Funktionen benötigt werden.

Die Liniengeometrien der Routen wurden zum einen durch Digitalisieren des Wegverlaufs auf Basis der ALK in das System übernommen, oder durch Aufnahme von Wegpunkte mittels GPS erfasst. Die aufgenommenen Punkte mussten anschließend in eine Linie konvertiert, optimiert und ausgedünnt werden. Mit Hilfe entsprechender Funktionen im GIS wurden zugehörige Puffer erzeugt. Die Geometrien der Weginformationpunkte und Sehenswürdigkeiten wurde durch Digitalisieren erzeugt, die Puffer wurden wiederum im GIS berechnet.

Die Navigation wird mit verschiedenen ortsbezogenen Diensten (Location Based Services) realisiert. Ein ortsbezogener Dienst ist ein „Dienst, Abfrage oder Prozess dessen Wiedergabe oder Eigenschaft vom Standort des nachfragenden Clienten und/ oder eines Objekts oder einer Person abhängig ist ...“ Das bedeutet zum einen, dass der Standort des Clienten bekannt

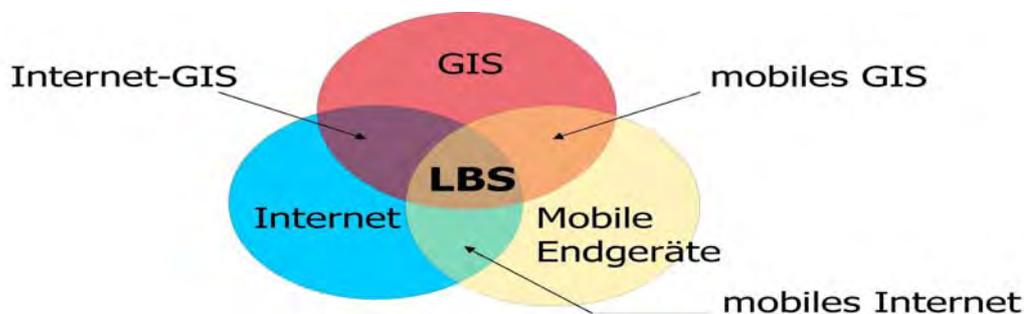


Abb. 2: LBS als Schnittmenge von GIS, Internet und mobilen Endgeräten (aus: LADSTÄTTER, 2002).

sein, und dieser – im Falle eines mobilen Clienten – zu orten sein muss (ISO TC 211, 2001). Zum anderen sind diese Dienste, Abfragen und Prozesse lageabhängig und bedingen damit den Einsatz von Geoinformationssystemen. Zur Kommunikation zwischen Dienst und Client wird ein Übertragungsmedium benötigt, in den meisten Fällen das Internet (SCHWEINFURTH & LIENHART, 2004).

Im Falle des vorliegenden Wandernavigationssystems sind Dienstanbieter und Client gleich. Der Client ist der PDA, der über den GPS-Empfänger seine aktuelle Position bezieht und Dienste in Anspruch nimmt, die auf ihm selbst ablaufen. Damit wird in diesem Fall die Komponente „Übertragungsmedium“ unnötig.

Die LBS des Wandernavigationssystems sind Dienste für die Sehenswürdigkeiten, die Weginformationen, die Einhaltung des Wanderweges und der korrekten Wanderrichtung. Der Dienst für die Sehenswürdigkeiten überprüft mittels der empfangenen Standortkoordinaten, ob sich der Benutzer innerhalb einer Pufferzone und damit in der Nähe einer Sehenswürdigkeit befindet. Ist dies der Fall, so erscheint ein Fenster mit den zugehörigen Informationen. Ähnlich verhält es sich beim LBS der Weginformationen: hier wird ständig die Entfernung zum nächsten Punkt abgefragt, bis diese unter einen gewissen Wert sinkt. Falls dieser Wert unterschritten wird, erscheint auf dem Display des PDA die Information zum weiteren Verlauf der Strecke. Der LBS „Wanderwegpuffer“ überprüft, ob sich der Nutzer innerhalb oder außerhalb der Pufferzone für die gewählte Wanderroute befindet. Wird er außerhalb dieses Puffers geortet, so hat er wahrscheinlich den Wanderweg verlassen und wird freundlich darauf hingewiesen, wieder auf die vorgeschriebene Route zurückzukehren. Ähnlich verhält es sich für den LBS für die Wanderrichtung: Die Laufrichtung des Wanderers wird ständig mit der vorgegebenen Richtung überprüft. Falls sich nach einer gewissen Toleranz der Nutzer immer noch in die falsche Richtung bewegt, so kommt es zu einer Warnmeldung. (AGACIK, 2003, S. 72 ff).

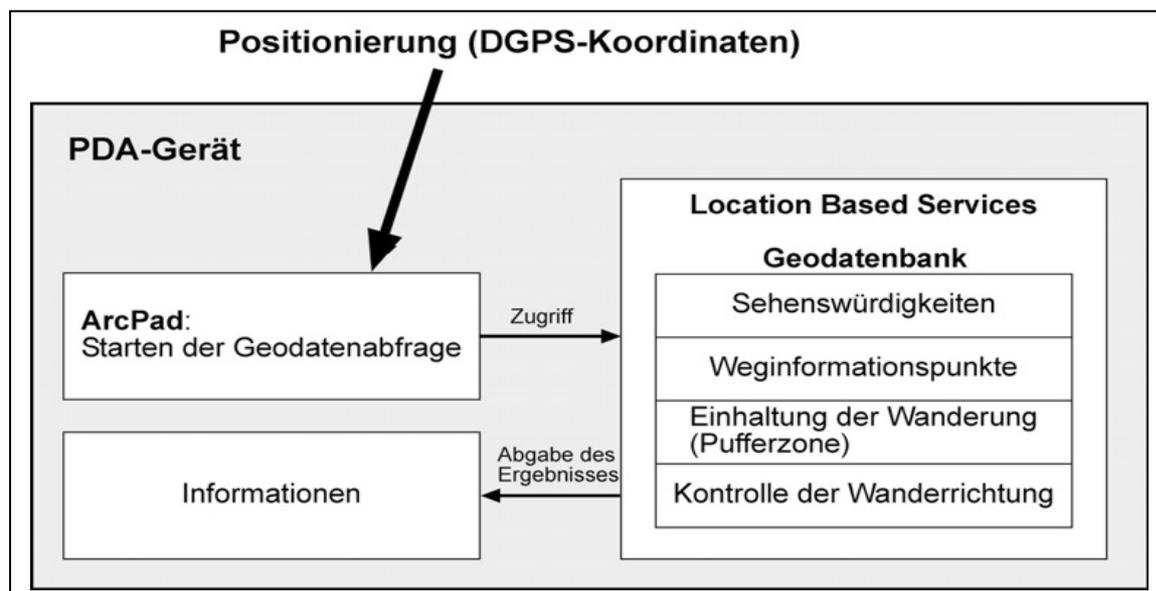


Abb. 3: Workflow des Wandernavigationssystems (aus: AGACIK, 2003)

Die verschiedenen Masken, Formulare und Warnmeldungen der ortsbezogenen Dienste wurden in ArcStudio erstellt. In der gleichen Anwendung wurde auch die Funktionalität der Dienste mittels der Sprache VBScript programmiert.

Nicht verschwiegen werden sollen auch die Probleme, mit denen man sich auseinandersetzen musste. In der Software des Prototyps (Diplomarbeit) gab es kleinere Fehler, die im Nachhi-

nein behoben werden mussten, wozu sich der Diplomand, obwohl die Arbeit schon lange abgegeben und zensiert war, dankenswerterweise bereit zeigte. Als weiteres Problem stellte sich die Fehlerhaftigkeit der Daten und der große Speicherplatzbedarf derselben heraus. Teilweise führte auch der schlechte Empfang des GPS-Signals zu nicht zufrieden stellenden Ergebnissen.

4. Anwendung in der Praxis

Wenngleich der in der Diplomarbeit gefertigte Prototyp des Wandernavigationssystems den Vorgaben und Erwartungen entsprach, so war er trotzdem vor allem wegen des Aussehens und des Tragekomforts für den Einsatz im touristischen Bereich noch nicht tauglich. Zudem erschien die Auswahl von nur zwei Wanderwegen als zu gering. Somit entschloss man sich, zunächst noch vier weitere Routen einarbeiten zu lassen. Auf Seiten der Hardware entschied man sich, nach einem Versuch mit dem von einer großen Discounter-Kette angebotenen GPS und PDA System, für eine handliche HOLUX GM-270 Ultra High Sensitiv GPS Karte, deren Gewicht nur 50 g beträgt und die über die Compact Flash – CF Typ I Schnittstelle direkt in den PDA eingesteckt werden kann und ohne externe Stromversorgung auskommt. Die Genauigkeit des Zwölf-Kanal-Empfängers wird mit fünf bis 25 Metern angegeben. Als PDA wurde der ca. 150 g leichte HP iPAQ Pocket PC H2210 beschafft, ausgestattet mit einem 400 MHz schnellen INTEL Prozessor, 64 MB SDRAM und dem Betriebssystem Microsoft Windows Pocket PC Premium Edition.



Abb. 4: PDA mit GPS-Modul und Kopfhörer

Derzeit kann man bei der Tourist-Information der Stadt Oberkirch drei Geräte kostenfrei gegen die Hinterlegung des Personalausweises entleihen. Diese wurden zum Teil mit Hilfe von Sponsoren beschafft. Das System enthält zum jetzigen Zeitpunkt sechs verschiedene Routen unterschiedlicher Länge und verschiedenen Schwierigkeitsgrads.

SCHWEINFURTH & LIENHART (2004) zu Folge sind die Geräte nachgefragt und erfreuen sich einer positiven Resonanz: „An 50 Tagen wurde das Navigationssystem von insgesamt 65 Benutzern ausgeliehen. Die Freqüentierung war im Schnitt 75 Prozent aller Tage zwischen September und November 2003. Der Altersschnitt der Benutzer lag zwischen 35 und 65 Jahren, wobei das Feedback vor allen Dingen bei den Älteren überwiegend positiv war.“

5. Ausblick auf die Zukunft

Zukünftig soll die Zahl der verfügbaren Geräte auf zehn bis zwölf aufgestockt werden. Mit weiteren Routen möchte man das Wandernavigationssystem noch attraktiver machen. Weitere Ideen für ortsbezogene Dienste sind z.B. „Schlemmertipps“ (Speisekarte der Restaurants am Wegesrand) und „Einkaufshinweise“, mit denen auch die örtliche Gastronomie und der lokale Handel mit einbezogen und als Sponsoren gewonnen werden soll. Vom Diplomanden wurde auch eine Existenzgründung angedacht, die zur weiteren Vermarktung an andere interessierte Städte und Gemeinden und zur Weiterentwicklung des Systems führen sollte.

Bei einem euphorischen Blick in die Zukunft sollte nach SCHWEINFURTH & LIENHART (2004) Folgendes beachtet werden:

- Schon heute gibt es mehr mobile als stationäre Internet-Nutzer.
- Eine breite Öffentlichkeit wird künftig mobile Endgeräte mit GPS nutzen.
- Als Folge dessen wird der Bedarf an LBS im Bereich „Lifestyle“ zunehmen.
- Lifestyle-orientierte Anwendungen stehen im Gegensatz zu denen im professionellen Umfeld.
- Hohe Ansprüche an Geodaten werden für die Weiterentwicklung der Dienste gestellt.
- Flächendeckende Datensätze dieser Qualität, die auch ständig gepflegt werden müssen, sind auf absehbare Zeit nicht verfügbar.

6. Literaturverzeichnis

AGACIK, G., 2003: Konzeption und Entwicklung eines GPS-gestützten Wandernavigationssystems auf der Grundlage von ArcPad. Diplomarbeit im Studiengang Kartographie und Geomatik an der Fachhochschule Karlsruhe – Hochschule für Technik (unveröff.).

ISO TC 211, 2001: Geographic Information – Navigation and Tracking. 2001-05-02.

LADSTÄTTER, P., 2002: Ein Standpunkt kann bares Geld wert sein – LBS in der Unternehmenspraxis. Paper zur AGIT 2002, Salzburg 2002.

SCHWEINFURTH, G. & A. LIENHART, 2004: Wandern mit dem PDA. In: Kartographische Schriften. Bd. 9. Der X Faktor – Mehrwert für Geodaten und Karten. Symposium 2004. 17. bis 19. Mai 2004. Königslutter am Elm. Bonn. S. 90 -96.

Integration von Daten unterschiedlicher Herkunft

GUIDO V. GÖSSELN¹, MATTHIAS BUTENUTH² & MICHAEL TIEDGE³

Zusammenfassung: In geowissenschaftlichen Anwendungen stellt die Topographie der Erdoberfläche und die darauf aufbauenden topographischen Daten die elementare Informationsgrundlage dar. Bei der gemeinsamen Nutzung räumlicher Daten in GIS-Applikationen treten im Allgemeinen Widersprüche zwischen den heterogenen Datensätzen auf, die in den unterschiedlichen Datenmodellen, Erfassungsmethoden und Fortführungszyklen begründet sind. Neue Methoden zur semantischen und geometrischen Integration von Daten unterschiedlicher Herkunft sollen helfen, den Aufwand bei der manuellen Anpassung der Datensätze zu minimieren. Am Beispiel der Integration von geowissenschaftlichen Daten mit ATKIS werden im Rahmen des GEOTECHNOLOGIEN-Programms Anwendungen entwickelt, mit deren Hilfe die automatisierte Integration, die Ableitung von neuen Objekten aus aktuellen Luftbildern sowie die gemeinsame Verwaltung der Daten in einer föderierten räumlichen Datenbank ermöglicht werden. In diesem Beitrag wird eine Übersicht über die entwickelten Strategien und Methoden zur Lösung der Datenintegration gegeben.

1 Einleitung und Motivation

Die Darstellung der Erde in Geoinformationssystemen (GIS) kann in den unterschiedlichsten Repräsentationsformen erfolgen. Die Form der Darstellung und die Aufbereitung der Daten ist dabei von den verwendeten Sensoren, mit denen die Daten erfasst werden, und dem jeweiligen Anwendungsgebiet bzw. der Fragestellung abhängig. Die Integration von heterogenen Daten unterschiedlicher Herkunft sowie unterschiedlichen Typs ermöglicht die Analyse komplexer Fragestellung im geowissenschaftlichen Umfeld, die mit einzelnen Datensätzen allein nicht zu lösen sind. Die Verwendung unterschiedlicher Datensätze in einem GIS führt jedoch in vielen Fällen zu Inkonsistenzen und Diskrepanzen, die eine aufwendige Neuerfassung notwendig machen. Neue Methoden zur semantischen und geometrischen Datenintegration können hier einen wichtigen Beitrag leisten, um mit den vorhandenen Datensätzen neue Fragestellungen bearbeiten und lösen zu können.

Im Rahmen des GEOTECHNOLOGIEN-Programms werden an der Universität Hannover neue Verfahren entwickelt, um geowissenschaftliche Datensätze unterschiedlichster Herkunft zu integrieren und neue Daten abzuleiten (SESTER ET AL. 2003). Die effiziente Speicherung und Abfrage der heterogenen Datensätze wird durch eine föderierte räumliche Datenbank ermöglicht, die im Rahmen dieses Projektes entwickelt wird. Die Verwendung unterschiedlicher Datensätze, aber auch unterschiedlicher Datentypen, die sich durch Aufnahmeverfahren, Aussageschwerpunkte und Fortführungszyklen unterscheiden, führen hierbei zu semantischen und geometrischen Problemen, die bislang nur auf manuellem Wege und in den meisten Fällen nicht ausreichend zu lösen waren. Dies führt in den meisten Fällen zu einer Neu- bzw. Doppelerfassung der Daten. Die Integration heterogener Daten wird daher zunehmend wichtiger und ermöglicht grundsätzlich folgende Vorteile:

¹ Guido von Gössehn, Institut für Kartographie und Geoinformatik, Universität Hannover, Appelstr. 9a, 30167 Hannover, e-mail: guido.vongoesseln@ikg.uni-hannover.de

² Matthias Butenuth, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover, Nienburger Str. 1, 30167 Hannover, e-mail: butenuth@ipi.uni-hannover.de

³ Michael Tiedge, Institut für Informationssysteme – Fachgebiet Datenbanksysteme, Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover, e-mail: tiedge@dbs.uni-hannover.de

- Gegenseitige Nutzung der Datenbestände für unterschiedliche Fragestellungen: Übernahme von Informationen, die in einem Datenbestand nicht enthalten sind, in einen anderen
- Thematische Ergänzungen: Beispielsweise können durch die Verschneidung mehrerer Datensätze neue thematische Informationen abgeleitet werden
- Überprüfung der Qualität: die Korrektur von Unstimmigkeiten und die Steigerung der Genauigkeit wird durch die Integration ermöglicht

Die Integration von heterogenen Daten wird exemplarisch am Beispiel von geowissenschaftlichen Datensätzen mit ATKIS (Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem) durchgeführt. Datengrundlage sind hierbei die Bodenkundliche Karte (BK) und die Geologische Karte (GK), die vom Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung (NLFb) vorgehalten werden, und zusätzlich aktuellen Luftbildern. Zum einen steht dabei die Verknüpfung von räumlichen Datentypen, wie die Vektor-Vektor und die Raster-Vektor Integration im Vordergrund, und zum anderen die Verwaltung bzw. Bereitstellung der gewonnenen Verbindungen für Abfragen und Updates in einer föderierten räumlichen Datenbank.

2 Strategie zur semantischen und geometrischen Integration

Die gemeinsame Strategie der unterschiedlichen Fragestellungen erfordert eine semantische Integration vor der geometrischen Integration, da nur so die Bedeutung der zu integrierenden Objekte bekannt ist und Aussagen über die Geometrie und deren Genauigkeit möglich sind. Die semantische und geometrische Integration wird in drei Teilbereichen durchgeführt: Dabei behandelt der eine Teil die Integration von unterschiedlichen Vektordaten, indem korrespondierende Objekte einander zugeordnet und anschließend geometrisch angepasst werden. Der zweite Teilbereich befasst sich mit der Integration von Raster- und Vektordaten, indem Objekte aus aktuellen Luftbildern unter Berücksichtigung des ATKIS Basis-DLM extrahiert werden. Der dritte Teilbereich ermöglicht einen einheitlichen Zugriff auf die semantisch und geometrisch integrierten Datenbestände sowie die Speicherung von neu gewonnenen Objekten.

3 Integration von Vektor- und Vektordaten

3.1 Einleitung

Für die Integration der Vektordaten werden im Projekt drei verschiedene Datensätze untersucht. Der topographische Datensatz ATKIS, und aus dem Bereich der Geowissenschaften, die geologische Karte (GK25) und die bodenkundliche Karte (BK25) im Maßstab 1:25.000. Durch die Umstellung von analogen Kartenwerken auf digitale Datensätze, ergeben sich völlig neue Möglichkeiten für die Handhabung und die Auswertung dieser Datensätze und ermöglicht die Kombination dieser Datensätze in einem Geoinformationssystem (GIS). Die einfache Überlagerung dieser Datensätze in einer GIS-Applikation macht jedoch die Unterschiede und Diskrepanzen zwischen den verschiedenen Datensätzen deutlich. Diese wurden für unterschiedliche Anwendungszwecke konzipiert und basieren jeweils auf unterschiedlichen Aufnahmeverfahren. Bei den geowissenschaftlichen Kartenwerken liegt der Fokus auf dem thematischen Inhalt, der seine Gültigkeit im allgemeinen für Jahrzehnte behält und die topographischen Elemente dienen hier als

zusätzliche Information. ATKIS hingegen verfolgt den Anspruch gerade die Topographie hochaktuell mit der bestmöglichen Genauigkeit vorzuhalten (GÖSSELN & SESTER 2004). Obwohl sich die Datensätze auf eine gemeinsame Menge von topographischen Objekten beziehen, führen die unterschiedlichen Aufnahmeverfahren, Anwendungsgebiete und unterschiedlichen Fortführungszyklen zu Diskrepanzen, die eine kombinierte Auswertung erschweren und teilweise sogar unmöglich machen. Für die Lösung dieses Problem müssen die Unstimmigkeiten aufgesucht, die Datensätze harmonisiert und parallel fortgeführt werden, was jedoch auf manuellem Wege nicht nur unpraktikabel, sondern in den meisten Fällen unmöglich ist. Die Integration von Vektordaten durch semantische und geometrische Methoden soll hier einen praktikablen Lösungsweg darstellen (SESTER ET AL. 2003).

Die Integration heterogener geowissenschaftlicher Datensätze ist ein hochaktuelles Forschungsthema, das viele verschiedene Aspekte aus verschiedenen Forschungsgebieten zusammenbringt. Es gibt Strategien, die sich mit modularen Konzepten zur Integration beschäftigen (YUAN & TAO 1999). Die Entwicklung eines konzeptuellen Gerüsts für die Integration von geographischen Datensätzen wird in (UITERMARK 2001) beschrieben. Aktuelle Arbeiten zum Thema multi-skalige Datenbanken beschäftigen sich mit dem Thema Integration zur Verknüpfung der einzelnen Datenbestände (MANTEL 2002).

Im Rahmen der Vektordaten-Integration werden gängige Methoden untersucht und neue Verfahren entwickelt, um korrespondierende Objekte automatisch zu identifizieren, die Objektgeometrien anzupassen und Unterschiede zwischen den Datensätzen aufzudecken. Der Schwerpunkt der Forschung liegt hierbei auf den geometrischen Methoden, der Zusammenführung von Objekten, Anpassung der Objektgeometrien mittels einer iterativen Transformation, Verschneidung der Geometrien und Evaluierung der resultierenden Segmente (GOESSELN & SESTER 2004). In diesem Projekt wird ATKIS unter Berücksichtigung der höheren geometrischen Genauigkeit und Aktualität als Referenzdatensatz verwendet, und daher werden die geowissenschaftlichen Objekte direkt an ATKIS angepasst. Im weiteren Verlauf des Projektes wird der Ansatz jedoch erweitert, um bei der Integration verschiedener Datensätze die jeweilige Genauigkeit und Aktualität berücksichtigen zu können. Vor der geometrischen Integration werden die thematischen Inhalte der Datensätze verglichen, um sicher zu stellen, dass nur Objekte miteinander verglichen werden, die der gleichen topographischen Objektklasse (Wasser, Vegetation etc.) angehören.

Für die Integration müssen die Datensätze alle in einem einheitlichen Schema und Datenformat vorliegen, dies erfolgt mit Hilfe einer föderierten räumlichen Datenbank, deren Erstellung ein weiteres Teilprojekt im GEOTECHNOLOGIEN-Programm darstellt und die in Absatz 5. genauer beschrieben wird. Die Integration der Datensätze basiert auf der Erkennung korrespondierender Objekte einer thematischen Objektklasse, die in beiden Datensätzen vorhanden sind. Die Objektklasse Wasserflächen wurde hierfür ausgewählt, da sie in allen drei Datensätzen vertreten ist. Weitere Objektklassen werden im weiter Verlauf des Projektes in den Integrationsprozess mit eingebunden.

3.2 Harmonisierung von Daten und geometrisches Matching

Die Wasserflächen sind in den verschiedenen Datensätzen unterschiedlich repräsentiert. In ATKIS können diese als Linien und Flächen, in den geowissenschaftlichen Datensätzen nur als Flächen dargestellt werden. Mit Hilfe geeigneter Algorithmen können die linienhaften Wasserobjekte in Flächen umgewandelt und so mit den Objekten aus den

geowissenschaftlichen Datensätzen verglichen werden. Da die Objekte in den unterschiedlichen Datensätzen auf den gleichen „Real Welt“ Objekten basieren, zeigen korrespondierende Objekte deutliche Übereinstimmung in Form und Lage. Diese Objektbeziehungen können durch geometrische Vergleichs- und intelligente Suchverfahren aufgedeckt werden. Die Repräsentation korrespondierender Objekte kann sich aufgrund von Erfassungs- und Generalisierungseffekten voneinander unterscheiden, und somit erscheinen neben den einfachen naheliegenden 1:1 auch beliebige n:m-Relationen. Durch Betrachtung der flächenhaften Überlagerung werden in den verschiedenen Datensätzen vorläufige Suchgruppen aggregiert. Diese Suchgruppen werden dann mit Hilfe geometrischer Verfahren mit den Suchgruppen der anderen Datensätze verglichen, die entsprechend ihrer Lage als Kandidaten in Betracht kommen. Objekte bzw. die Suchgruppen aus den geowissenschaftlichen Datensätzen, die entsprechend ihrer Lage und Geometrien als korrespondierende Partner zu ATKIS Objekten selektiert wurden, werden mit Hilfe einer iterativen Transformation, basierend auf der Arbeit von (BESL & MCKAY 1992) an den ATKIS Datensatz angepasst, um eventuelle Unterschiede in Lage, Orientierung und Skalierung zu kompensieren. Nach dieser Anpassung werden die Objekte geometrisch miteinander verschnitten. Die so gewonnen Segmente werden anschließend bewertet, und in verschiedene Klassen eingeteilt und ermöglichen die Aufdeckung von Diskrepanzen zwischen den Datensätzen. Je nach Evaluierungsergebnis werden diese Segmente aus dem Datensatz entfernt, neu attribuiert oder zu anderen Objekten hinzugefügt (GOESSELN & SESTER 2004). Es wird erwartet, dass dieses Verfahren einen hohen Automatisierungsgrad liefern wird, so dass ein Großteil der evaluierten Segmente automatisch behandelt und in den entsprechenden Datensätzen verarbeitet werden kann. Bestimmte Objekte müssen jedoch von geowissenschaftlichen Operateuren bewertet werden, hier wird das Verfahren jedoch Bewertungs- und Verarbeitungsvorschläge liefern können.

4 Integration von Vektor- und Rasterdaten

4.1 Einleitung

Die Analyse, Aktualisierung und Visualisierung von Geodaten ist häufig nur mit einer gemeinsamen Nutzung unterschiedlicher raumbezogener und zum Teil heterogener Datensätze, d.h. durch Datenintegration, zu realisieren (vgl. Abschnitt 1). In diesem Zusammenhang wird die Integration von Vektordaten und digitalen Luftbildern untersucht, exemplarisch die Extraktion von Schlaggrenzen und Winderosionshindernissen unter Berücksichtigung des ATKIS Basis-DLM, um die Bodenkundliche Karte (BK) durch Informationen aus aktuellen Luftbildern automatisch anzureichern. Diese Informationen sind für verschieden Fragestellungen von hoher Bedeutung: Zum einen für die Ermittlung des Gefährdungsgrades einer Fläche bezüglich des Bodenabtrags durch Wind für geowissenschaftliche Problemstellungen (THIERMANN ET AL. 2002), und zum anderen für den Agrarsektor, zum Beispiel precision farming oder die Kontrolle von Subventionen (ANDERSON ET AL. 1999).

In der Vergangenheit wurden in der Bildanalyse viele Untersuchungen und Forschungsschwerpunkte auf den Bereich der künstlichen Objekte, wie zum Beispiel die Extraktion von Straßen und Gebäuden, fokussiert (MAYER 1998). Vergleichbare Untersuchungen finden sich auch für die Extraktion von einzelnen Bäumen aus Luftbildern, vgl. für eine Übersicht von Ansätzen (HILL & LECKIE 1999). Im Gegensatz dazu gibt es nur wenige Arbeiten, die sich mit der Extraktion von Schlaggrenzen befassen: (LÖCHERBACH

1998) präsentiert einen Ansatz zur Aktualisierung und Verfeinerung topologisch korrekter Schlaggrenzen, aber nicht zur Erfassung von neuen. In (TORRE & RADEVA 2000) wird eine Möglichkeit beschrieben, wie aus Luftbildern Schlaggrenzen mit der Hilfe von Flächenwachstumstechniken und Snakes gefunden werden, jedoch ist eine manuelle Initialisierung notwendig. Der hier vorgestellte Ansatz unterscheidet sich daher, da die Strategie einen automatischen Ablauf vorsieht.

4.2 Strategie zur Extraktion von Schlaggrenzen und Winderosionshindernissen

Entscheidend für die Bildanalyse ist die Nutzung von Vorwissen (z.B. GIS-Daten), um die automatische Extraktion der Objekte aus Luftbildern zu unterstützen (BALSAVIAS 2004). Zu Beginn werden daher alle relevanten Objekte und deren beeinflussende Umgebung gemeinsam mit Vorinformationen in einem semantischen Modell dargestellt, um die zahlreichen Verbindungen zwischen den verschiedenen Objekten aufzuzeigen, Details siehe (BUTENUTH 2004). So bildet zum Beispiel das Verkehrsnetz eine Einschränkung der Szene und stellt zugleich bereits einen Teil der zu suchenden Schlaggrenzen dar. Ebenso sind Winderosionshindernisse häufig auf Schlaggrenzen oder parallel und direkt neben Straßen angesiedelt.

Die Strategie zur Extraktion von Schlaggrenzen und Winderosionshindernissen teilt den Ansatz zunächst in zwei Teile, in denen die Objekte separat aus den Bildern abgeleitet werden sollen. Zu einem späteren Zeitpunkt werden die dann gewonnenen Ergebnisse zusammengeführt und gemeinsam bewertet, um anschließend eine erweiterte Extraktion aufgrund der modellierten Eigenschaften durchführen zu können.

Die Prozesse zur Extraktion von *Schlaggrenzen* werden in jeder selektierten Region, die aus den ATKIS-Daten abgeleitet werden, separat ausgeführt: Eine Segmentierung unterteilt die Regionen in Feldbereiche, die eine grobe Strukturierung vorgeben. Dadurch wird die Tatsache ausgenutzt, dass einzelne Felder sich durch eine einheitliche und homogene Vegetation auszeichnen. Bei benachbarten Feldern mit derselben Vegetation werden Schlaggrenzen jedoch übergangen, weshalb eine Linienextraktion mit anschließender Bewertung und Gruppierung diese fehlenden Grenzen detektiert. Geometrische Ungenauigkeiten werden mit der Initialisierung eines Snake-Ansatzes behoben, Details finden sich in (BUTENUTH 2004).

Die Extraktion von *Winderosionshindernissen* wird zunächst auf die unmittelbare Umgebung der Verkehrswege fokussiert, um initiale geometrische Vorinformation zu nutzen. Des Weiteren wird die ganze Region untersucht, wobei die modellierten Eigenschaften der Winderosionshindernisse stärker genutzt werden, da es hier entsprechend keine geometrischen Vorinformationen gibt. Die Generierung eines Digitalen Oberflächenmodells (DOM) spielt eine entscheidende Rolle, da die gewonnenen Höheninformationen eine gute Hilfe bei der Extraktion der Objekte darstellen. Ebenso wird aus den CIR-Luftbildern der NDVI-Kanal berechnet, aufgrund dessen die ausgeprägte Vegetation der Winderosionshindernisse gut zu extrahieren ist.

Im Anschluss an die separate Extraktion der Objekte folgt eine gemeinsame Bewertung, um die modellierten thematischen und geometrischen Gemeinsamkeiten zu nutzen. Eventuell auftretende Widersprüche werden in einem verfeinerten Extraktionsprozess abschließend behandelt und entsprechend korrigiert.

5 Föderierte räumliche Datenbank

5.1 Einleitung

Im dritten Teilprojekt wird ein integrierter Zugriff auf die heterogenen Datensätze gemäß dem Paradigma für föderierte Datenbanken ermöglicht. Die Architektur föderierter Datenbanken wird dahingehend erweitert, mit den räumlichen Daten dieses Projektes umgehen zu können, soll aber auf ähnliche Datenbestände übertragbar bleiben. Hierfür werden allgemeine Methoden für föderierte Datenbanken spezialisiert, um korrespondierende Objekte identifizieren zu können (CONRAD 1997).

Das Paradigma föderierter Datenbanken wurde gewählt, da es sowohl einen einheitlichen Zugriff auf die integrierten Datenbestände über ein globales Schema als auch den direkten Zugriff über die lokalen Schemata der heterogenen Datensätze ermöglicht. Der Föderationsdienst an sich benötigt eine Integrationsdatenbank, um die Importe der Komponentendatenbanken (ATKIS, BK und GK), die Verknüpfungen zwischen den korrespondierenden Objekten und neu gewonnenen Objekten zu verwalten. Die Integrationsdatenbank ist gemäß eines globalen Datenschemas strukturiert, welches durch Integration der Schemata der verschiedenen Datensätze abgeleitet wurde (Export-Schemata), erweitert um das Konzept der Verknüpfungen zwischen den Objekten (Link-Schema). Um die Integrationsdatenbank mit Daten anzureichern, sind Methoden der Datenintegration nötig, so dass korrespondierende Objekte in Beziehung gesetzt werden können. Für Standarddaten sind Integrationsmethoden hinreichend in der Datenbankliteratur zusammengestellt und klassifiziert (CONRAD 1997). Räumliche Daten hingegen benötigen eine weitere Behandlung, um in Beziehungen gesetzt werden zu können. Hierfür soll die Integrationsdatenbank eine Auswahl von Integrationsregeln und -methoden aus dem geowissenschaftlichen Bereich bereitstellen. Das erste Ziel ist die Unterstützung des Matchings von räumlichen Objekten vergleichbaren Typs und die Integration der Ergebnisse der beiden anderen Teilprojekte durch die Integrationsdatenbank. Im Folgenden wird das Schema-Design für die verschiedenen geowissenschaftlichen Datensätze (Komponentendatenbanken), für die Ergebnisse des Matchings und für die Metadaten, die den Matchingprozess unterstützen, vorgestellt.

Im ersten Schritt werden die thematischen und geometrischen Daten der heterogenen Datensätze, die in verschiedenen Formaten und Schemata vorliegen, in ein objekt-relationales Datenbanksystem importiert und gemäß den Regeln der Datenbanktheorie normalisiert, um Redundanzen zu entfernen und Inkonsistenzen sowohl zu erkennen als auch zu lösen. Im nächsten Schritt werden Export-Schemata angelegt, um einen einheitlichen Zugriff auf die thematischen und geometrischen Daten zu ermöglichen. In Bezug auf Modellierung, Import und Verarbeitung von geowissenschaftlichen Datensätzen in objekt-relationalen Datenbanken wurden insbesondere mit ATKIS-Daten Erfahrungen gesammelt (KLEINER ET AL. 2000). Eine vereinfachte Version des entworfenen ATKIS-Datenbankschema dient hier als Vorlage für die Export-Schemata der verschiedenen Datenbestände (TIEDGE ET AL. 2004).

5.2 Link-Schema

Die im ersten Teilprojekt gewonnenen Verknüpfungen zwischen geowissenschaftlichen Objekten lassen sich nicht immer durch einfache 1:1-Beziehungen darstellen, sondern sind im Allgemeinen komplexer, da Realwelt-Objekte in verschiedenen Datensätzen unterschiedlich repräsentiert werden, zum Beispiel oftmals unterschiedlich in Segmente zerteilt sind. Das

entworfene Link-Schema ist in der Lage, diese allgemeinen Korrespondenzen zwischen geowissenschaftlichen Objekten in der Integrationsdatenbank darzustellen (MANTEL & LIPECK 2004). Um die allgemeinen n:m-Beziehungen abzubilden, wird die Verknüpfung zwischen zwei Objektmengen als Verknüpfung zwischen aggregierten Objekten interpretiert. Zusätzlich werden in diesem Link-Model die topologischen Beziehungen zwischen den Objektteilen vermerkt („überlappt“, „beinhaltet“ etc.), da sie die spätere Fortführung von Updates zwischen korrespondierenden Objekten unterstützen können. Weiterhin ermöglicht die föderierte räumliche Datenbank die Integration der angepassten geowissenschaftlichen Objekte des ersten Teilprojektes und der neu gewonnenen des zweiten Teilprojektes.

5.3 Metadaten für die Kontrolle des Matching-Prozesses

Um Korrespondenzen zwischen geometrischen Objekten in heterogenen Datensätzen finden zu können, ist es sinnvoll, beim objektbezogenen Matching nur Objekte ähnlichen Typs zu vergleichen. Wie im ersten Teilprojekt beschrieben, erscheint das Matching zwischen Gewässerobjekten viel versprechend, wobei die Attribute, die Gewässerobjekte charakterisieren, in den verschiedenen Datensätzen unterschiedlich dargestellt werden. Für den Matching-Prozess werden die semantischen Attribute harmonisiert, indem die korrespondierenden Objektarten der verschiedenen Datensätze in entsprechende Objektklassen klassifiziert werden (TIEDGE ET AL. 2004). Aufbauend auf dieser Attributharmonisierung findet das geometrische Objektmatching statt, ohne dass die ursprüngliche Repräsentation der thematischen Attribute bekannt sein muss. Ein weiterer Aspekt der Integrationsdatenbank sind Methoden sowie Parameter und Regeln, um den Prozess der Klassifikation, des Matchings und der Konfliktauflösung zu unterstützen (Metadaten-Schema). Später soll weiterhin die Fortführung von Änderungsoperationen entlang Objektkorrespondenzen bei der Harmonisierung von geometrischen Objekten durch Regeln ermöglicht werden.

6 Ergebnisse und Ausblick

Die hier vorgestellten Methoden zur Integration von Daten unterschiedlicher Herkunft werden in enger Zusammenarbeit mit externen Partnern aus dem Bereich der Geowissenschaften entwickelt. Die dabei erzielten Ergebnisse können somit als Prototypen verwendet und eingesetzt werden. Ein weiteres Ziel ist die Übertragbarkeit der Entwicklungen auf andere Fragestellungen, die sich mit der Integration von Vektor- und Rasterdaten und der Bereitstellung der Ergebnisse befassen. Die aktuellen Ergebnisse bei der Integration der geowissenschaftlichen Datensätze mit ATKIS machen deutlich, dass ein hoher Automatisierungsgrad und somit eine Reduzierung des manuellen Aufwands erreichbar ist (GÖSSELN & SESTER 2004). Zum jetzigen Zeitpunkt haben die erzielten Ergebnisse gezeigt, dass die vorgestellte Strategie und die entwickelten Methoden im Bereich der Integration von Raster- und Vektordaten sinnvoll sind, detaillierte Ergebnisse zu der Extraktion von Schlaggrenzen und Winderosionshindernissen zu erhalten (siehe BUTENUTH 2004). Die aufgestellte Architektur einer föderierten räumlichen Datenbank zeigt die einheitlichen Zugriffsmöglichkeiten auf die integrierten sowie neu gewonnenen Daten (Details siehe TIEDGE ET AL. 2004).

Referenz

Die hier vorgestellten Arbeiten sind Teil des GEOTECHNOLOGIEN-Programms, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) unter der Publikationsnummer GEOTECH-77.

Literatur

- ANDERSON, J. E., FISCHER, R. L. & DELOACH, S. R., 1999: Remote Sensing and Precision Agriculture: Ready for Harvest or Still Maturing? *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 65, No. 10, pp. 1118-1123.
- BALTSAVIAS, E. P., 2004: Object Extraction and Revision by Image Analysis Using Existing Geodata and Knowledge: Current Status and Steps towards Operational Systems. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 58, No. 3-4, pp. 129-151.
- BESL, P. & MCKAY, N., 1992: A Method for Registration of 3-D Shapes, *Trans. PAMI*, Vol. 14(2), pp. 239-256.
- BUTENUTH, M., 2004: Modelling the Extraction of Field Boundaries and Wind Erosion Obstacles from Aerial Imagery, In: *Proceedings of XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, July 12-23, 2004 (im Druck)*.
- CONRAD, S.: 1997: *Föderierte Datenbanksysteme*, Springer-Verlag, Berlin.
- GOESSELN, G. & SESTER, M., 2004: Integration of geoscientific data sets and the german digital map using a matching approach. In: *Proceedings of XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, July 12-23, 2004 (im Druck)*.
- HILL, D. A. & LECKIE, D. G. (Eds.), 1999: *International forum: Automated interpretation of high spatial resolution digital imagery for forestry*, February 10-12, 1998, Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, Victoria, British Columbia, 395 p.
- KLEINER, C., LIPECK, U. & FALKE, S.: 2000: Objekt-Relationale Datenbanken zur Verwaltung von ATKIS-Daten, 2000, pp. 169-177. In: Bill, R.; Schmidt, F.: *ATKIS - Stand und Fortführung*, 2000, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 2000, pp. 169-177.
- LÖCHERBACH, T., 1998: *Fusing Raster- and Vector-Data with Applications to Land-Use Mapping*, Inaugural-Dissertation der Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn, Bonn, 107 p.
- MANTEL, D., 2002: *Konzeption eines Föderierungsdienstes für geographische Datenbanken*. Diploma thesis, unpublished, University of Hannover.
- MANTEL, D. & LIPECK, U.: 2004: *Datenbankgestütztes Matching von Kartenobjekten*. Erscheint in: *Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie*, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- MAYER, H., 1998: *Automatische Objektextraktion aus digitalen Luftbildern*, Habilitation Reihe C, Deutsche Geodätische Kommission, München, No. 494.
- SESTER, M., BUTENUTH, M., GÖSSELN, G. V., HEIPKE, C., KLOPP, S., LIPECK, U. & MANTEL, D., 2003: *New Methods for Semantic and Geometric Integration of Geoscientific Data Sets with ATKIS - Applied to Geo-Objects from Geology and Soil Science*, in: *Geotechnologien Science Report "Information Systems in Earth Management"*, Koordinierungsbüro Geotechnologien, Potsdam, No. 2, 51- 62.
- THIERMANN, A., SBRESNY, J. & SCHÄFER, W., 2002: *GIS in WEELS - Wind Erosion on Light Soils*. *GeoInformatics*, No. 5, pp. 30-33.

- TIEDGE M., LIPECK, U. & MANTEL, D., 2004: Design of a Database System for Linking Geoscientific Data, Geotechnologien Science Report "Information Systems in Earth Management", No. 4, Koordinierungsbüro Geotechnologien, Potsdam, 2004, pp. 83-87.
- TORRE, M. & RADEVA, P., 2000: Agricultural Field Extraction from Aerial Images Using a Region Competition Algorithm, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam, Vol. XXXIII, No. B2, pp. 889-896.
- UITERMARK, H., 2001: Ontology-based geographic data set integration. Doctor thesis, Deventer, Netherlands.
- YUAN, S. & TAO, C. 1999: Development of conflation components. In: Li, B. et al., eds., Geoinformatics and Socioinformatics, The proceedings of Geoinformatics'99 conference, Ann Arbor, pp. 1-13.

Webservices – die Basis für den wirtschaftlichen Einsatz von Geodatenservern in verteilten Unternehmenssparten

Uwe Meyer¹, Carsten Schmidt² & Carsten Weyand³

1 Einleitung

Im Rahmen der Reorganisation von Konzern-Unternehmen als Folge von Fusionen oder Geschäftsfeldkonzentrationen stellt sich in zunehmendem Maße für die „Geofachleute“ in diesen Unternehmen das Problem der inhomogenen Datenbestände. Unterschiedliche Geoinformations- und CAD-Systeme mit unterschiedlichen Datenmodellen und -strukturen müssen zusammengeführt werden.

Zur unternehmensweiten effizienten Nutzung bietet der Einsatz standardisierter Geodatenserver die Möglichkeit der Prozessoptimierung. Nachdem die Mehrzahl der Systemanbieter diese internationalen Standards inzwischen akzeptiert und in ihre Produkte integriert hat, ist es in den meisten Großunternehmen möglich, über Geodatenserver interdisziplinär auf fast alle intern und extern vorhandenen Daten mit Geobezug zuzugreifen. Der eigentliche Mehrwert hierbei entsteht aber erst durch die Nutzung von Webservices. Der Einsatz dieser auf Webtechnologie basierenden Softwaretools ermöglicht es auch fachfremden Benutzern, Prozesse zu vereinfachen und durch neue Analysemöglichkeiten wirtschaftliche und technische Zusammenhänge zu visualisieren, ohne sich dazu spezielle Kenntnisse der Geoinformatik aneignen zu müssen. Durch die unternehmensweite Bereitstellung von Webservices steigt die Akzeptanz zum Einsatz von Geodaten bzw. wird der strukturübergreifende Nutzen von Geodaten vielfach erst ermöglicht.

Am Beispiel des Einsatzes verschiedener Webservices auf der Basis eines neu aufgebauten Geodatenportals bei RWE Power soll diese These untermauert werden. Der interne Geodatenservice kann inzwischen von ca. 3000 Mitarbeitern des Energieversorgers genutzt werden. Bei RWE Power wird der Zugriff auf verschiedenste Geodaten durch einen hochperformanten Geodatenserver ermöglicht. Die Mitarbeiter nutzen die Daten via Webservices, die von der g.on experience mit Microsoft .NET Technologie entwickelt wurden. Diese Methode erfordert auf den Clients keine zusätzliche Spezialsoftware und damit auch keine zusätzlichen Investitionen.

2 Der Einsatz eines Geodatenservers in einem Energiekonzern

2.1 Ausgangssituation, Konventionelles Datenmanagement

Die RWE Power AG fördert im Tagebaugelände Garzweiler I pro Jahr knapp 38 Millionen Tonnen des fossilen Energieträgers Braunkohle. Dabei werden rund 140 Millionen Kubik-

¹ Dr.-Ing. Uwe Meyer, g.on experience gmbh, Willy-Brandt-Weg 33, 48155 Münster, e-mail: uwe.meyer@gon.de

² Dipl.-Ing. Carsten Schmidt, g.on experience gmbh, Willy-Brandt-Weg 33, 48155 Münster, e-mail: carsten.schmidt@gon.de

³ Dipl.-Ing. Carsten Weyand, RWE Power AG, Stüttgenweg 2, 50935 Köln, email: carsten.weyand@rwe.com

meter Abraum bewegt: Kies, Löss und Sand, mit dem das Unternehmen seine ehemaligen Abbaugelände auffüllt und nachhaltig rekultiviert.

Der Tagebau verändert die Oberflächenstruktur der betroffenen Areale permanent. Aktuelle Vermessungen und die Kartierung regelmäßig aufgenommener Luftbilder liefern beständig frischen Input an die geografische Datenbasis des Energieunternehmens – nicht nur für Garzweiler I, sondern auch für die anderen RWE-Tagebaugelände Hambach und Inden. Diese ständig aktualisierten Geodaten werden in vielen Unternehmensbereichen benötigt. Für die Fachabteilung waren zur Realisierung dieser Anforderungen bisher die verschiedensten Hürden zu überwinden.

Topografische Grundkarten, die sich je nach Kontext mit fachlich unterschiedlichen Meta-Informationen anreichern lassen, werden an vielen Stellen im Unternehmen benötigt, nicht nur in der Tagebauplanung, der Rechtsabteilung oder dem Liegenschaftswesen, sondern auch im Einkauf oder Marketing. Allerdings blieb die direkte Nutzung dieser Daten in der Vergangenheit den vergleichsweise wenigen Anwendern geografischer Informationssysteme (GIS) vorbehalten. RWE Power nutzt für unterschiedliche Zwecke diverse GIS wie *GeoMedia* oder *ArcView*, aber auch CAD-Software wie *MicroStation* und *AutoCAD*. Etwa 270 speziell geschulte Mitarbeiter arbeiten mit diesen Systemen. Alle anderen – und ihre Zahl geht in die Tausende – waren für ihren Kartenbedarf bislang auf die Repraabteilung angewiesen. Wartezeiten waren hier meist unvermeidlich.

Arbeitszeit ging außerdem verloren durch die Ablageorganisation geografischer Daten im File System. Der Zugriff erfolgte über Kartennummern. Es dauerte viel zu lange, bis der gewünschte Kartenausschnitt im richtigen Maßstab endlich auf dem Bildschirm zur Verfügung stand. Problematisch war außerdem das Handling mehrerer grundverschiedener GIS-Datenformate, das für die Anwender extrem aufwändig war.

2.2 Geodatenserver als Basis eines modernen Datenmanagements

Der Geodatenserver ist ein modernes Instrument, die Funktionalitäten unterschiedlicher Geoinformationssysteme mit Daten aus unterschiedlichen Datenquellen zu kombinieren. Er hilft als Basis den Workflow der Datennutzung im Unternehmen und damit die Effizienz zu steigern.

Der Geodatenserver

- gibt Informationen über Datenverfügbarkeit,
- stellt Daten bereit,
- regelt Benutzerzugriffe
- und bietet eine Plattform für Webapplikationen.

2.3 Standards sorgen für Investitionsschutz

2.3.1 Webservices

Webservices auf der Basis von .NET bilden ein geeignetes Werkzeug, die Aufgaben der Datenverteilung und -nutzung zu realisieren. Sie sind der Schlüssel für die kosteneffiziente und unternehmensweite Bereitstellung geografischer Daten über das Intranet von RWE.

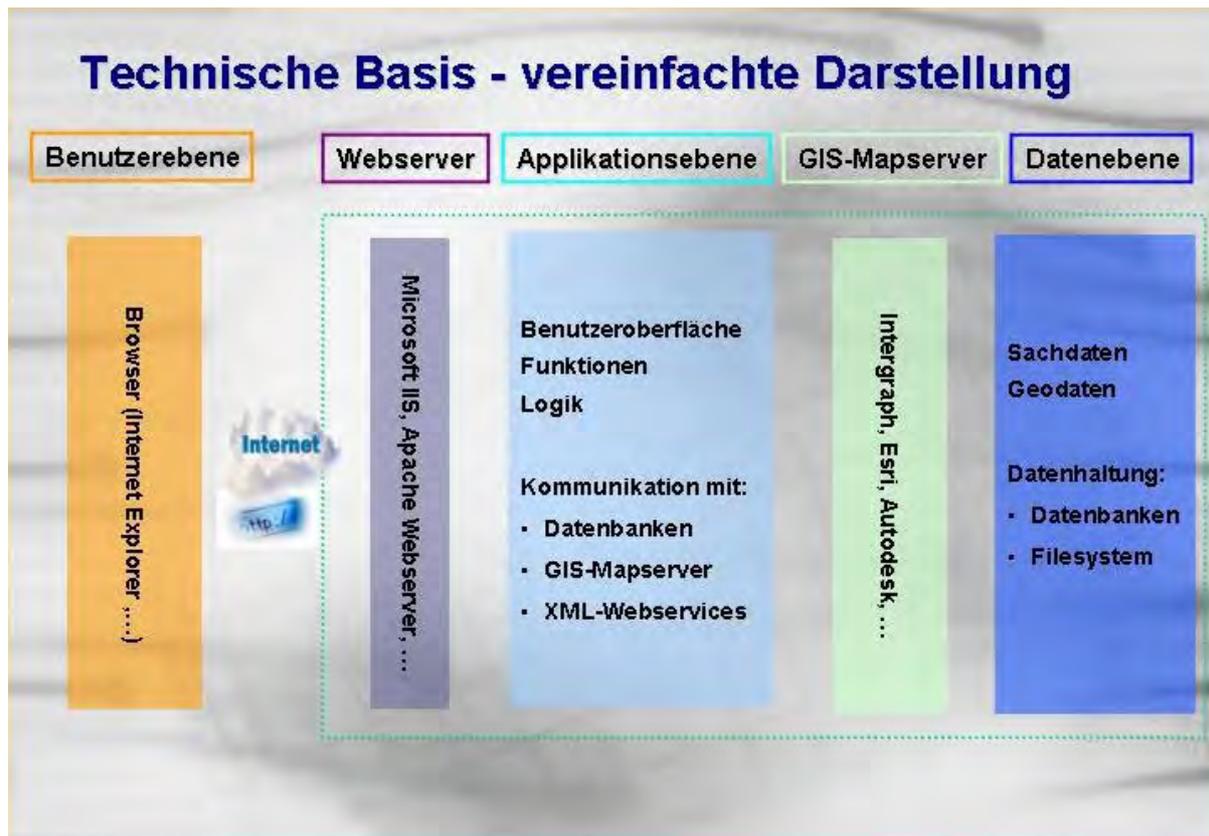


Abb. 1: Geodatenserver als Baustein der unternehmensweiten Datennutzung

Webservices

- sind Bausteine, die über das Internet verteilt sind
- stellen Funktionalitäten und Daten über das Internet bereit
- werden via Internet an Geräte wie Desktop-Rechner, Server oder PDA's geliefert
- ermöglichen es, dass Computer, Anwendungen, mobile Geräte und Geschäftsprozesse miteinander kommunizieren.

Dank internationaler Standards wie XML (Extensible Markup Language) und SOAP (Simple Object Access Protocol) bietet die Microsoft-Technologie zudem ein Maximum an Zukunftssicherheit und Investitionsschutz. Denn .NET-Lösungen, zumal wenn sie Webservices nutzen, sind system- und plattformunabhängig. Sie bedienen im konkreten Fall bedarfsgerecht alle vorhandenen GIS. Von den Lizenzkosten für die Geo-Informationssysteme einmal abgesehen, repräsentieren die entsprechenden Mitarbeiterqualifikationen erhebliche Schulungsinvestitionen, die dank .NET auch künftig geschützt bleiben. Die Lösung bei RWE Power setzt sich nach dem Baukastenprinzip aus verschiedenen Webservices zusammen:

- **geo.webservice.datenkatalog**
 - gibt per Mausklick Auskunft über Verfügbarkeit, Format und Aktualität eines bestimmten Kartenausschnitts. Und anders als früher offeriert das System verschiedene Einstiegsoptionen: neben Koordinaten zum Beispiel auch Adressen oder Flurstücksnummern.

- **geo.webservice.geocode**
steuert die Geocodierung bei. Er gleicht zudem alle Adresseingaben ab und korrigiert automatisch mögliche Tippfehler bei der Adresseingabe.



Abb. 2: Geo-Webservices

2.3.2 .NET

.Net (sprich dotNet) ist die geeignete Plattform zur Realisierung von Webdiensten. Die Definition für .NET von Microsoft lautet:

Bei .NET handelt es sich um die Plattform für XML-Webdienste von Microsoft. Durch XML-Webdienste können Anwendungen über das Internet oder ein Intranet kommunizieren und gemeinsam auf Daten zugreifen – unabhängig vom Betriebssystem oder der Programmiersprache.

Vor wenigen Jahren noch waren Browser als Programme zum Anzeigen von HTML-Seiten und zum Benutzen von Hyperlinks bekannt. Heute werden sie teilweise als Plattform mit einer Fülle von Features zum Erstellen von webbasierten Anwendungen und zum Entwickeln von informativem Inhalt für Benutzer beschrieben. Browser können HTML interpretieren, was heutzutage als selbstverständlich und gegeben angesehen wird, als Hintergrund für die eigentlichen Informationen.

Genauso kann .NET mit XML arbeiten. .NET ist eine Dienstplattform mit einer Fülle von Features zum Erstellen webbasierter Anwendungen und zum Entwickeln reichhaltiger interaktiver Erfahrungen für Benutzer und deren Systeme. Wenn von "web" (mit kleinem w) die Rede ist, sind sowohl das Internet als auch Intranets gemeint.

.NET und „Interaktiv“

Interaktiv bedeutet mehr als das Anklicken von Hyperlinks oder das Ausfüllen von HTML-Formularen. Warum kann man nicht online einen Zahnarzttermin vereinbaren? Oder eine Ausgabe der Frankfurter Allgemeinen Zeitung online erhalten, die sich auf die Informationen konzentriert, die der Leser heute lesen möchte (im Gegensatz zu den gestern gewünschten Informationen)? Und warum können IT-Systeme nicht gemeinsam auf Daten zugreifen?

Die Technologie dafür ist auch ohne .NET vorhanden. Allerdings ist die Programmierarbeit für den Hersteller sehr aufwändig und wird, sobald Clientlogik erforderlich wird – wenn beispielsweise Outlook den Terminplan mit dem Zahnarzt koordinieren soll – noch viel aufwändiger.

.NET wurde entwickelt, um diese Ebene der Interaktion zu vereinfachen, sogar übergreifend über verschiedene Systeme. Bei der IT müssen sowohl interne als auch B2B (business to business)-Geschäftsbereichsanwendungen und -systeme beachtet werden. Wenn Systeme mit .NET arbeiten können, können sie diese verbinden und Benutzern mithilfe von Tools den Zugriff auf datenbasierte Informationen gewähren, die diese benötigen. So kann man sich arbeitsaufwändiges Programmieren ersparen. Anders formuliert stellt .NET den Unterschied zwischen dem Anzeigen einer einzelnen Website in einem Browser mit Lesen oder Eingeben von Informationen und dem Arbeiten in einer Umgebung dar, in der Informationen aus über das Internet verteilten Systemen in einer reichhaltigen Ansicht gesammelt werden können, die Beteiligung, Kreativität, Bemerkungen und wirkliche Interaktion von Benutzern mit den Anwendungen unterstützt.

.NET ergänzt den heutigen HTML-Ansatz, ersetzt ihn aber nicht. HTML leistet ausgezeichnete Arbeit bei denjenigen Problemen, bei denen eine Website Informationen darstellt oder einfache Daten von einem Benutzer sammelt. Wenn man jedoch für das Web programmieren möchte und wenn jedes Gerät – bei Interaktionen von Server zu Server oder von Server zu Client – so behandeln möchte, dass auf intelligente und flexible Art Daten in verschiedenen Formaten ausgetauscht werden, und wenn zudem noch so viel Möglichkeiten zur Selbstauskunft gegeben sein sollen, dass die Anwendungen sich an diese Daten anpassen, dann ist .NET, auf XML/SOAP basierend, der Schlüssel zum Erfolg.

Für die unternehmensweite Verteilung von Daten an verschiedenste Fachdisziplinen bedeutet also .NET als Basis für die Entwicklung von Webdienste die Lösung der (meisten) Probleme.

2.4 Vorhandene Systeme nahtlos integriert

Sämtliche beschriebenen Funktionen stehen sowohl im Browser als auch unter *MicroStation*, *GeoMedia* oder *AutoCAD* zur Verfügung. Für alle gängigen CAD- und GI-Systeme werden bei dem bei RWE Power installierten System vorkonfigurierte Erweiterungen geliefert, die alle benötigten Daten und Funktionen in das jeweilige System integrieren. Das gleiche gilt für Office-Programme wie Excel oder PowerPoint. Zudem erleichtern Wizards, die man von Windows her kennt, den Umgang mit den Geodaten. Aus Sicht der Architektur – und das berührt wieder den Aspekt der Zukunftssicherheit – kann das System neben beliebigen Desktop-, Server- und Browserclients problemlos auch mobile Endgeräte mit hochwertigen geografischen Daten versorgen. Interessant ist das zum Beispiel für Unternehmen mit Außendienstmitarbeitern, vorausgesetzt, dass nicht wie bisher etliche Megabyte pro Kartenausschnitt übertragen werden müssen.

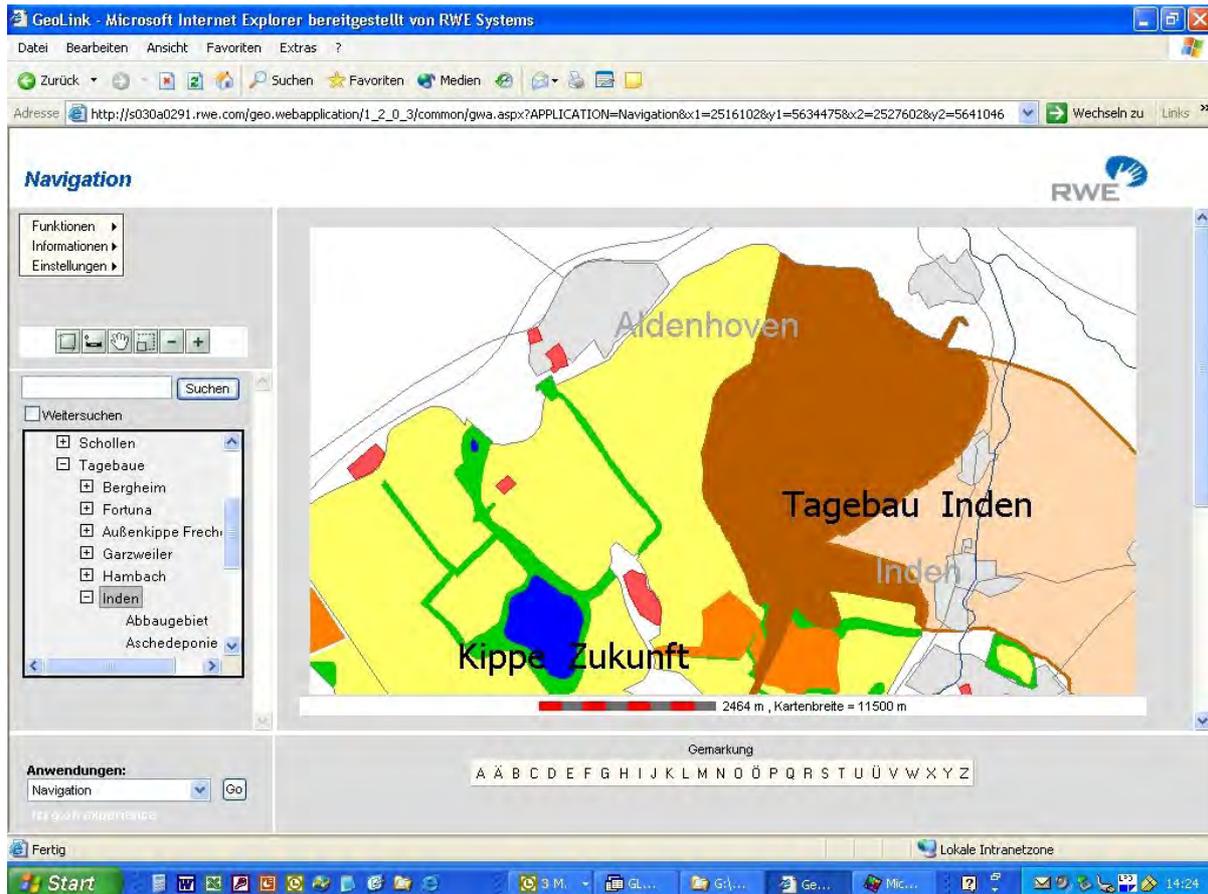


Abb. 3: Beispiel: Navigation Geodaten RWE Power

3 Resümee

Den größten Gewinn der zentralen Geodatenhaltung auf .NET-Basis erzielen die Unternehmen durch die Möglichkeit, dass Mitarbeiter aus allen Abteilungen und Bereichen selbständig auf das digitale Kartenmaterial zugreifen können. Die Produktivität ihrer Geschäftsprozesse wird nicht mehr durch Wartezeiten beeinträchtigt. Zudem entfallen die früher erforderlichen aufwändigen Reproleistungen, was noch einmal zu enormen Einsparungen führt. Die Investitionen in die .NET-Lösung refinanzieren sich allein durch interne Produktivitätsgewinne.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Einsatz von Webservices auf der Basis von Geodatenservern in verteilten Unternehmenssparten zum Produktionsgewinn führt und damit einen schnellen *return of invest* ermöglicht.

Semantisch korrekte Integration von Digitalem Gelände- und Landschaftsmodell - Verfahren und Ergebnisse

ANDREAS KOCH¹

Zusammenfassung: Digitale Landschaftsmodelle (DLM) und Digitale Geländemodelle (DGM) gehören in Deutschland zu den Basisdaten der Landesvermessungen der Länder. Die Integration beider Datensätze führt zu objektstrukturierten Geodaten mit Bezug zur dritten Dimension. Inkonsistenzen zwischen den Daten, verursacht durch Unterschiede in Modellierung und Genauigkeit, können zu einem semantisch inkorrekten Integrationsergebnis führen. So kann es vorkommen, dass Seeflächen kein konstantes Niveau besitzen und Straßen extreme Neigungen und Krümmungen in Fahrtrichtung und quer dazu aufweisen.

Dieser Beitrag beschreibt ein Verfahren, welches die semantische Korrektheit eines integrierten DGM-DLM-Datensatzes herstellt. In dem zweistufigen Verfahren werden in einem ersten Schritt die Datensätze auf der Basis einer Triangulation integriert. In einem zweiten Schritt werden Bedingungen formuliert, die die implizite Höheninformation von Objekten beschreiben. In einem Optimierungsprozess werden die Höhen des integrierten Datensatzes verändert, sodass die zuvor definierten Bedingungen eingehalten werden. Das Verfahren wird am Beispiel einer Straße erläutert, Ergebnisse mit synthetischen und realen Daten werden präsentiert.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Digitale Landschaftsmodelle (DLM) und Digitale Geländemodelle (DGM) gehören in Deutschland zu den Basisdaten der Landesvermessungen der Länder. Das ATKIS Basis-DLM beschreibt die Geländetopographie zweidimensional mit Hilfe von Objekten, die durch Punkte, Linien und Flächen repräsentiert werden. Demgegenüber stellt das ATKIS DGM 5 der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN) eine 2,5dimensionale Beschreibung der Geländeoberfläche dar. Die Daten liegen in gitterförmiger Anordnung mit zusätzlichen Strukturinformationen vor. Beide Datensätze werden getrennt voneinander hergestellt. Während das DLM vor allem durch Digitalisierung von Orthophotos entsteht, wird bei der Erstellung des DGM hauptsächlich Laserscanning und Photogrammetrie eingesetzt.

Die Integration beider Datensätze führt zu objektstrukturierten Geodaten mit Bezug zur dritten Dimension. Inkonsistenzen zwischen den Daten, verursacht durch Unterschiede in Modellierung und Genauigkeit, können zu einem semantisch inkorrekten Ergebnis führen. So kann es vorkommen, dass Seeflächen kein konstantes Niveau besitzen und Straßen extreme Neigungen und Krümmungen in Fahrtrichtung und quer dazu aufweisen. Die Wiederherstellung der semantischen Korrektheit, d.h. die Beseitigung von Inkonsistenzen zwischen den Daten, ist daher von großer Bedeutung bei der gemeinsamen Verwendung dieser Daten.

Die Anwendungsbereiche semantisch korrekt integrierter Datensätze sind vielfältig. 2,5D Visualisierungen benötigen konsistente Daten und können wichtig bei Hochwassersimulationen und Katastrophenschutz sein. Auch die verbesserte Herstellung von Orthophotos in Bereichen von nicht modellierten Brückenbauwerken sei hier genannt. Neben den Visualisie-

¹ Dipl.-Ing. Andreas Koch, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover, Nienburger Straße 1, 30167 Hannover, e-mail: koch@ipi.uni-hannover.de

rungen ist es möglich die durch die Herstellung der semantischen Korrektheit verursachten Veränderungen zur Verifikation der Basisdaten zu verwenden.

1.2 Stand der Forschung

Die Integration Digitaler Geländemodelle und zweidimensionaler GIS-Daten ist seit mehr als einem Jahrzehnt Gegenstand der Forschung. WEIBEL (1993), FRITSCH & PFANNENSTEIN (1992) und FRITSCH (1991) führen unterschiedliche Formen der Integration ein: Im Falle der *Höhenattributierung* erhält jeder Punkt des GIS-Datensatzes die Punkthöhe als Attribut. Die Nutzung von *Schnittstellen* ermöglicht die Interaktion zwischen DGM-Programm und GIS-System. Die Systeme sind entweder unabhängig voneinander oder DGM-Methoden sind in die Benutzeroberfläche des GIS-Systems integriert. Die *totale Integration* oder *Datenbankintegration* setzt ein einheitliches Datenmanagement innerhalb der Datenbank voraus. Die Geländedaten werden in der Datenbank zumeist in Form eines Triangular Irregular Network (TIN) gespeichert, wobei die Punkte nicht mit den Daten des GIS vermischt sind. Die Zusammenführung der Daten, die Integration, wurde z.B. von LENK (2001), KLÖTZER (1997) & PILOUK (1996) untersucht. Die Verfahren unterscheiden sich in der Reihenfolge des Einführens der 2D-GIS-Geometrie, die Größe der Veränderungen des originären DGM-TIN und die Anzahl Knoten nach Durchführung der Integration. Alle Verfahren haben gemeinsam, dass Inkonsistenzen zwischen den Datensätzen vernachlässigt werden und somit zu einem semantisch inkorrekten Ergebnis führen können. ROUSSEAU & BONIN (2003) beschäftigen sich mit der Integration von 2D linearen Daten (z.B. Straßen, Dämme, Böschungen) und Digitalen Geländemodellen. Dabei werden die linearen Objekte in 2,5dimensionale Flächen unter Verwendung von Höhenattributen des GIS-Datensatzes sowie der Höheninformation des DGM transformiert. Die semantische Korrektheit der Objekte wird überprüft, doch wird bei inkorrekten Ergebnissen die Korrektheit nicht wiederhergestellt. Ein neues DGM wird unter Verwendung der ursprünglichen DGM-Höhen und der 2,5D Objekte des GIS-Datensatzes berechnet.

2 Semantik in der Geländemodellierung

Die Objekte des ATKIS® Basis-DLM beschreiben die Geländetopographie zweidimensional mit Hilfe von Punkten, Linien und Flächen. Attribute, die die Größe, Form und Bedeutung der Objekte beschreiben, stellen den ergänzenden geometrischen und semantischen Teil der Objekte dar. So werden z.B. Straßen linienförmig modelliert, die Fahrbahnbreite und die Funktion der Straße (Bundesautobahn, Bundesstraße, usw.) sind Attribute dieses Objektes.

Nur wenige Objekte enthalten Attribute, die einen Bezug zur dritten Dimension haben. Brücken besitzen eine Objekthöhe, der als „Abstand zwischen dem tiefsten Punkt der Erdoberfläche bzw. der mittleren Wasserspiegelhöhe und dem senkrecht darüber liegenden Verkehrsweg“ definiert ist.

Obwohl ein Großteil der Objekte keinen Bezug zur dritten Dimension in Form von Attributen besitzt, ist es dennoch möglich, einen Bezug herzustellen, da einige Objekte implizit Höheninformation enthalten. Diese Objekte sind in **Tab. 1** aufgeführt.

Die linke Spalte der **Tab. 1** beinhaltet die Beschreibung der Höheninformation der Objekte. Generell kann zwischen drei Objektbeschreibungen unterschieden werden: Objekte, die durch horizontale Ebenen repräsentiert werden, aus zusammengesetzten Teilebenen bestehende Objekte und Objekte, die eine Höhenrelation zu anderen Objekten besitzen.

Straßen und Wege können je nach Gelände unterschiedliche Neigungen und Krümmungen in Fahrtrichtung und quer dazu aufweisen. Doch sind diese Werte erfahrungsgemäß begrenzt. Die Grenzwerte ergeben sich aus der Funktion der Straße. So können Ortsstraßen größere

Neigungen in Fahrtrichtung besitzen als Bundesautobahnen, da die Geschwindigkeit der Fahrzeuge innerhalb von Ortschaften geringer ist.

Beschreibung der Höheninformation	Objekt
Horizontale Ebene	Sportplatz, Rennbahn
Horizontale Ebene, ansteigendes angrenzendes Gelände	Hafen, Kanal, See, Schwimmbad
Zusammengesetzte Teilebenen, begrenzte Neigungen und Krümmungen in Fahrtrichtung	Straße, Weg
Zusammengesetzte Teilebenen, abfallendes Niveau in Fließrichtung, ansteigendes angrenzendes Gelände	Fluss
Höhenrelation zu anderen Objekten	Brücke, Unter- / Überführung

Tab. 1: Objekte mit impliziter Höheninformation und deren Beschreibung

Der Bezug der Objekte zur dritten Dimension ergibt sich aus den Beschreibungen der **Tab. 1**. Der integrierte DLM-DGM-Datensatz ist semantisch korrekt, wenn die Beschreibung der Höheninformation korrekt wiedergegeben ist.

3 Das Verfahren

Das Verfahren ist zweistufig. In einem ersten Schritt werden die Datensätze integriert. Dabei wird auf bestehende Algorithmen zurückgegriffen, die die Integration auf der Basis einer Triangulation durchführen. In einem zweiten Schritt wird die semantische Korrektheit hergestellt. Hierbei werden die Beschreibungen aus **Tab. 1** mathematisch in Form von Bedingungsgleichungen und –ungleichungen formuliert. Diese werden einem Optimierungsprozess zugeführt, der die Höhen des integrierten Datensatzes ändert, sodass die Bedingungen eingehalten werden. Nachfolgend werden beide Schritte des Verfahrens exemplarisch am Beispiel einer Straße näher erläutert.

3.1 Integration von DGM und DLM auf der Basis einer Triangulation

Die originären Punkte des Objektes bilden die Mittelachse der Straße. Diese wird mit dem DGM-Dreiecksnetz (DGM-TIN) verschnitten, sodass neue Punkte, so genannte Steiner-Punkte, hinzukommen. Der Grund für die Verschneidung ist, dass an allen Schnittpunkten der Objektgeometrien mit dem Dreiecksnetz Neigungsänderungen auftreten können. Um zu einem späteren Zeitpunkt des Verfahrens eine bestmögliche Anpassung der Straße an das originäre DGM-TIN zu gewährleisten, ist somit eine Hinzunahme dieser Steiner-Punkte erforderlich. Die Mittelachse der Straße wird gepuffert, um aus dem linienförmig modellierten Objekt ein flächenhaftes Objekt zu erhalten. Die Punkte des äußeren Begrenzungs-polygons werden in das bestehende TIN integ-

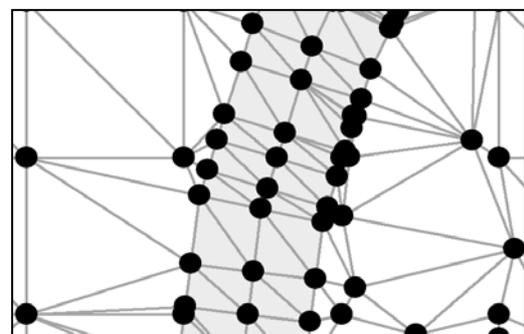


Abb. 1: Integrationsergebnis

riert, sodass die Objektgeometrien Bestandteil des TIN sind. Innerhalb der Straße wird das bestehende Dreiecksnetz gelöscht und lokal neu trianguliert. Dieses ist erforderlich, um eine Beschreibung der Höheninformation in Form von Bedingungen zu ermöglichen. **Abb.** stellt das Ergebnis der Integration von DGM und dem DLM-Objekt Straße (hell graue Fläche) dar.

3.2 Herstellung der semantischen Korrektheit

Die semantische Korrektheit wird mit Hilfe eines Optimierungsprozesses hergestellt. Hierbei werden die Höhen des integrierten Datensatzes verändert. Die Lagekoordinaten des DLM werden bis zu diesem Zeitpunkt als fehlerfrei angenommen und somit nicht innerhalb des Optimierungsprozesses geschätzt. Die Optimierung basiert auf einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen. Es werden so genannte Basisbeobachtungen sowie Bedingungsgleichungen, formuliert mit Hilfe von Pseudobeobachtungen, eingeführt. Bedingungsgleichungen erweitern das Modell, sodass die Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen in das Lineare Komplementaritätsproblem (linear complementary problem, LCP) überführt wird.

3.2.1 Basisbeobachtungen

Das Objekt Straße besteht im integrierten Datensatz aus Punkten, die sich auf der Mittelachse befinden (**Abb.**, dunkel grau dargestellt), Punkten des begrenzenden Objektpolygons (hell grau) sowie Punkten des ursprünglichen Digitalen Geländemodells, die sich innerhalb des Objektpolygons befinden (weiß mit schwarzem Rand). Die Höhen dieser Punkte sind unbekannte Parameter des Optimierungsprozesses. Als Basisbeobachtung wird eingeführt, dass die Differenz zwischen originärem und geschätztem Höhenwert verschwinden soll:

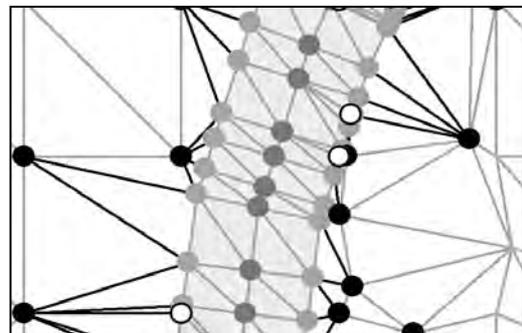


Abb. 2: Basisbeobachtungen, Objekt Straße

$$0 + \hat{v}_i = \hat{Z}_i - Z_i \quad \text{Gl. 1}$$

Z_i ist die ursprüngliche und \hat{Z}_i die zu schätzende Höhe des Punkte P_i . \hat{v}_i ist die Verbesserung der Beobachtungsgleichung.

Des weiteren wird diese Basisbeobachtung eingeführt für Punkte, die sich in direkter Nachbarschaft zu diesem Objekt befinden (**Abb. 2**, schwarz dargestellte Punkte). Dieses ist der Fall, wenn mindestens eine Dreieckskante dieses Punktes als zweiten Punkt einen Punkt des begrenzenden Objektpolygons enthält.

Diese Dreieckskanten werden zugleich als weitere Basisbeobachtung eingeführt, um eine Verbindung zwischen dem angrenzenden Gelände und dem Objekt herzustellen (**Abb. 2**, scharze Linien):

$$Z_i - Z_j + \hat{v}_{ij} = \hat{Z}_i - \hat{Z}_j \quad \text{Gl. 2}$$

3.2.2 Bedingungsgleichungen und -ungleichungen

Straßen werden, wie in Abschnitt 2 beschrieben, aus geneigten Teilebenen zusammengesetzt. Die Mittelachse wird gepuffert, jeder Punkt der Mittelachse bildet mit den nach der Pufferung

neu hinzugekommenen Punkten der linken und rechten Seite ein Querprofil der Straße, wobei jeweils zwei Querprofile eine geneigte Teilebene aufspannen. Straßen besitzen begrenzte Neigungen und Neigungsdifferenzen. In Fahrtrichtung wird die begrenzte Neigung durch folgende Ungleichung ausgedrückt:

$$s_{Max} \geq \left| \frac{\hat{Z}_n - \hat{Z}_o}{D_{no}} \right| \quad \text{Gl. 3}$$

Darin bezeichnen \hat{Z}_n und \hat{Z}_o die unbekanntenen zu schätzenden Höhen zweier in Fahrtrichtung aufeinander folgender Punkte. D_{no} ist die horizontale Entfernung zwischen den Punkten, s_{Max} bezeichnet die maximal zugelassene Neigung.

In Analogie zur Neigung der Straße in Fahrtrichtung wird eine maximale Neigungsdifferenz ds_{Max} zugelassen:

$$ds_{Max} \geq \left| \frac{\hat{Z}_n - \hat{Z}_o}{D_{no}} - \frac{\hat{Z}_o - \hat{Z}_p}{D_{op}} \right| \quad \text{Gl. 4}$$

Der Einfachheit halber wird eine Querneigung der Straße vernachlässigt. D.h. Punkte eines Querprofils sollen die gleiche Höhen aufweisen, was durch folgende Pseudobeobachtung ausgedrückt wird:

$$0 + \hat{v}_{nq} = \hat{Z}_n - \hat{Z}_q \quad \text{Gl. 5}$$

Hierin bezeichnen \hat{Z}_n und \hat{Z}_q Punkte der Mittelachse und der linken Seite bzw. der Mittelachse und der rechten Seite der Straße. Diese Annahme kann nur für die Punkte getroffen werden, die keine originären Punkte des Objektes sind. Grundsätzlich findet an den originären Objektpunkten ein Richtungswechsel in der Ebene statt. Dieser führt in Verbindung mit einem Neigungswechsel dazu, dass das Querprofil in diesem Punkt nicht horizontal sein kann.

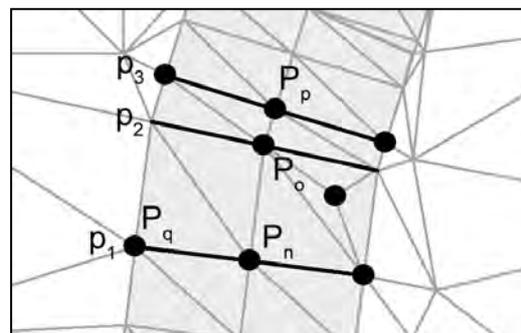


Abb. 3: Bedingungsgleichungen und -ungleichungen bei einer Straße

Die Punkte, die zu zwei benachbarten Querprofilen gehören, sowie die Punkte zwischen diesen Profilen sollen auf einer Ebene liegen, die durch die Querprofile aufgespannt wird. Diese Bedingung wird durch folgende Beobachtungsgleichung ausgedrückt:

$$0 + \hat{v}_r = \hat{a}_0 + \hat{a}_1 X_r + \hat{a}_2 Y_r - \hat{Z}_r \quad \text{Gl. 6}$$

Hierin bezeichnen X_r, Y_r die Lagekoordinaten eines Punktes P_r , \hat{Z}_r ist die unbekanntene zu schätzende Höhe des Punktes, \hat{a}_0 , \hat{a}_1 und \hat{a}_2 sind die unbekanntenen Koeffizienten der geneigten Teilebene. Ein Sonderfall ergibt sich wiederum bei Punkten eines Querprofils, welches nicht horizontal ist. Die äußeren Punkte dieses Profils ergeben sich nach Durchführung

des Optimierungsprozesses, indem die benachbarten Teilebenen verschnitten werden. Die Schnittgerade bildet das Querprofil, sodass die Punkte auf dieser Geraden liegen (siehe **Abb. 3**, Profil p_2).

3.2.3 Optimierungsprozess

Die Basisbeobachtungen (Abschnitt 3.2.1) und die Bedingungsgleichungen und -ungleichungen (Abschnitt 3.2.2) werden einem Optimierungsprozess zugeführt, welcher auf einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen mit zusätzlichen Bedingungsungleichungen basiert. Das stochastische Modell der Beobachtungen (Basisbeobachtungen und Bedingungsgleichungen) besteht aus der Kovarianzmatrix, welche in die Gewichtsmatrix überführt werden kann. Unter der Annahme unkorrelierter Beobachtungen enthält die Diagonale der Gewichtsmatrix die reziproken Genauigkeiten der Beobachtungen. Die Einhaltung der Bedingungsgleichungen wird durch entsprechend hohe Gewichtung der jeweiligen Pseudobeobachtung erreicht. Die Lösbarkeit des Optimierungsprozesses, d.h. die semantische Korrektheit des Integrationsergebnisses, hängt von der Wahl der Gewichte ab.

Der Algorithmus wird als Lineares Komplementaritätsproblem (LCP) formuliert, welches mit Hilfe des Lemke-Algorithmus (LEMKE, 1968) gelöst wird. Weitere Details zum Algorithmus sind zu finden bei KOCH (2004), das LCP wird detailliert von LAWSON & HANSON (1995), FRITSCH (1985) und SCHAFFRIN (1981) erläutert.

4 Ergebnisse

4.1 Synthetische Daten

Die Untersuchungen basieren auf einem synthetischen DGM, welches nahezu eine konstante Höhe von 100 m aufweist. Nur eine Gitterlinie mit konstantem Rechtswert ragt aus der Ebene heraus, die Höhe beträgt hier 101,25 m. Die synthetische Straße stellt ein linienförmig modelliertes aus 3 Punkten bestehendes Objekt dar.

Im integrierten Datensatz besteht die Mittelachse der Straße aus 11 Punkten: 3 originäre Punkte sowie 8 durch Schnitt mit dem originären DGM-TIN sich ergebende Punkte. Die Straße wurde gepuffert, sodass das Umringspolygon der Straße aus 22 Punkten besteht, Steiner-Punkte kamen nicht hinzu. **Abb. 4**

oben stellt den integrierten Datensatz dar. Die Punkte der Mittelachse der Straße sind hell grau dargestellt, die des Straßenrandes dunkel grau und die des benachbarten Geländes schwarz. Die Straße enthält 11 Querprofile und wird durch 10 Ebenen repräsentiert. **Abb. 4** unten zeigt das Längsprofil, welches sich durch Höheninterpolation an den Positionen der 11 Punkte der Mittelachse ergibt. Der erste Straßenabschnitt von 0 bis etwa 65 m ist horizontal. Es folgt ein zweiter Abschnitt mit einer Steigung von 0,05. Die maximale Höhe beträgt 101,25 m, was dem Rücken des DGM entspricht. Im letzten Abschnitt beträgt die Steigung der Straße -0,05, die maximale Neigungsdifferenz ist 0,1.

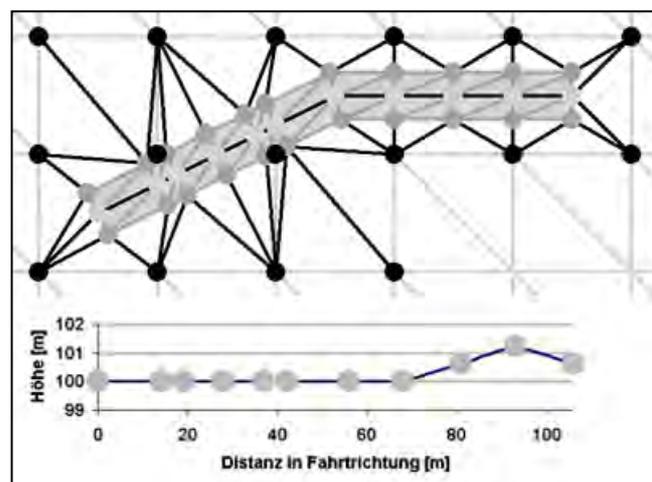


Abb. 4: Synthetischer Datensatz Straße, oben: Integrationsergebnis, unten: Längsprofil

Sind die Bedingungsungleichungen (Gl. 3, 4) nach der Integration von DGM und Straße nicht eingehalten, führt die Verwendung gleicher Gewichte für alle Beobachtungsgleichungen (Gl. 1, 2 und 5, 6) innerhalb des Optimierungsprozesses zu Veränderungen der Höhen der Punkte der Mittelachse, der Punkte des Umringspolygons sowie der Punkte außerhalb des Objektes. Die Bedingungsungleichungen werden nach Durchführung des Optimierungsprozesses eingehalten, doch sind nicht mehr alle Querprofile horizontal und die Punkte weisen Abstände von den Ebenen auf. Eine höhere Gewichtung von 10^4 der Gl. 1 für die Objektpunkte des Umringspolygons resultiert in eine ausschließliche Veränderung der Höhen der Mittelachse. Das benachbarte Gelände bleibt ebenfalls unverändert. Wird nur Gl. 1 für die Punkte außerhalb des Objektes höher gewichtet (10^4), verändern sich die Höhen der Punkte der Mittelachse und die des Umringspolygons. Die Bedingungsungleichungen (Gl. 5, 6) werden auch hier nicht eingehalten.

Erst eine höhere Gewichtung der Bedingungsungleichungen (Gl. 5, 6) führt zu einem semantisch korrekten Datensatz. Die Größe der Gewichte bestimmt die Größe der Veränderungen der Höhenkomponenten des integrierten Datensatzes sowie die Größe des beeinflussten Bereiches, d.h. die Größe des Gebietes, wo Höhenänderungen stattfinden. Bereits ein Gewicht von 10^1 für Gl. 5 und 10^2 für Gl. 6 führt zur Einhaltung der Bedingungen und somit zu einem semantisch korrekten Datensatz. Eine wesentlich höhere Gewichtung von 10^5 für beide Gleichungen führt zwar auch zur Einhaltung der Bedingungen, doch sind die Veränderungen und der beeinflusste Bereich wesentlich größer als zuvor. Zusätzlich werden dort Neigungen in Fahrtrichtung erzeugt, wo zuvor horizontales Gelände vorlag.

Demnach spielt die Gewichtswahl eine entscheidende Bedeutung bei der Herstellung der semantischen Korrektheit. Hier ist ein Kompromiss zu finden zwischen der Einhaltung der Bedingungen und der Größe der Veränderungen sowie der Größe des beeinflussten Gebietes.

4.2 Reale Daten

Als reale Datensätze wurden das ATKIS DGM 5 sowie Straßen des ATKIS Basis-DLM der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen benutzt. Das DGM 5 besteht aus Punkten in gitterförmiger Anordnung bei einem Gitterabstand von 12,5 m. Zusätzlich stehen Strukturinformationen zur Verfügung. Die linienförmig modellierten Straßen des Basis-DLM wurden mit Hilfe des Attributs Fahrbahnbreite gepuffert. **Abb. 5** links zeigt das Ergebnis der Integration ohne Berücksichtigung der Semantik der Straßen. Die Querneigungen der Straßen stimmen mit der mittleren Hangneigung des Geländes überein, d.h. die Querprofile der Straßen sind nicht horizontal. Die Neigungen und Krümmungen in Fahrtrichtung übersteigen mehrfach die maximal zugelassenen Werte $s_{Max} = 0,05$ bzw. $ds_{Max} = 0,01$.

Die rechte Seite der **Abb. 5** stellt das Ergebnis nach Wiederherstellung der semantischen

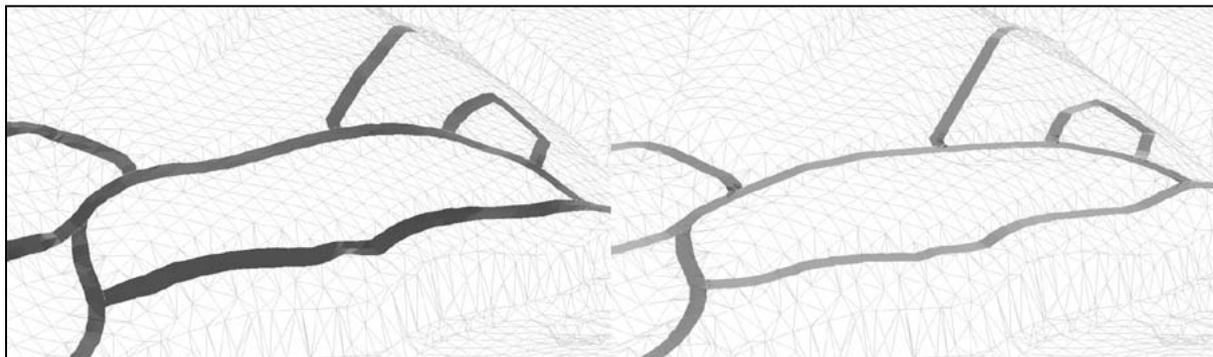


Abb. 5: Integration von ATKIS DGM 5 und Basis-DLM, links: keine Berücksichtigung der Semantik, rechts: mit Wiederherstellung der semantischen Korrektheit

Korrektheit dar. Zur Erzielung dieses Ergebnisses wurden 5226 Beobachtungen (Gl. 1, 2 und 5, 6) sowie 1336 Bedingungsungleichungen (Gl. 3, 4) formuliert. 2462 unbekannte Parameter (Höhenwerte und Koeffizienten der geneigten Schrägebenen) wurden geschätzt. Gleichungen 5 und 6 wurden mit 10^4 bzw. 10^3 gewichtet, um die Einhaltung der Bedingungen zu gewährleisten. Alle anderen Beobachtungsgleichungen erhielten das Gewicht 1. Die semantische Korrektheit ist nach Durchführung der Optimierung gewährleistet. Die maximal zulässigen Neigungen und Neigungsdifferenzen werden nicht überschritten, Abweichungen von den horizontalen Querprofilen und den geneigten Schrägebenen sind vernachlässigbar.

5 Literaturverzeichnis

- FRITSCH, D., 1985: Some Additional Information on the Capacity of the Linear Complementary Algorithm. In: E. Grafarend & F. Sanso, Hrsg., *Optimization and Design of Geodetic Networks*, Springer, Berlin, S. 169-184.
- FRITSCH, D., PFANNENSTEIN, A., 1992: Conceptual Models for Efficient DTM Integration into GIS. *Proceedings EGIS'92. Third European Conference and Exhibition on Geographical Information Systems*. München, S. 701-710.
- HEIPKE, C., 1986: Zum Vergleich von 2 Komplementaritäts-Algorithmen. Diplomarbeit der Technischen Universität München, nicht veröffentlicht.
- KLÖTZER, F., 1997: Integration von triangulierten digitalen Geländemodellen und Landkarten. Diplomarbeit des Instituts für Informatik, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, nicht veröffentlicht.
- KOCH, A., 2004: Semantically Correct 2.5D GIS Data – the Integration of DTM and Topographic Vector Data. *Proceedings SDH'04. 9th International Symposium on Spatial Data Handling*. Leicester, Großbritannien, angenommen.
- LAWSON, C. L., HANSON, R. J., 1995: *Solving Least Squares Problems*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia.
- LEMKE, C. E., 1968: On complementary pivot theory. In: G. B. Dantzig, A. F. Veinott, Hrsg., *Mathematics in the Decision Sciences*, Teil 1, S. 95-114.
- LENK, U., 2001: - 2.5D-GIS und Geobasisdaten - Integration von Höheninformation und Digitalen Situationsmodellen. *Wiss. Arb. Fachr. Verm. Universität Hannover Nr. 244 and DGK bei der Bayer. Akad. D. Wiss. Reihe C, Nr. 546*. Dissertation, Hannover.
- PILOUK, M., 1996: Integrated Modelling for 3D GIS. ITC Publication Series No. 40, Dissertation, Enschede, Niederlande.
- ROUSSEAU, F., BONIN, O., 2003: Towards a coherent integration of 2D linear data into a DTM. *Proceedings of the 21st International Cartographic Conference (ICC)*. S. 1936-1942, Durban, Südafrika.
- SCHAFFRIN, B., 1981: Ausgleichung mit Bedingungs-Ungleichungen. AVN, 6/1981, S. 227-238.
- WEIBEL, R., 1993: On the Integration of Digital Terrain and Surface Modeling into Geographic Information Systems. In: *Proceedings 11th International Symposium on Computer Assisted Cartography (AUTOCARTO 11)*. Minneapolis, Minnesota, USA, S. 257-266.

Danksagung

Das diesem Beitrag zugrunde liegende Projekt wurde von dem Landesbetrieb Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN) gefördert. Auch die für die Untersuchungen verwendeten Daten sind freundlicherweise von der LGN zur Verfügung gestellt worden.

Qualitätsmaße für digitale Geländemodelle am Beispiel eines Photogrammetrie- und eines Laserscannerprojektes

KARL KRAUS¹, MARIA ATTWENGER¹, CHRISTIAN BRIESE¹, GOTTFRIED MANDLBURGER²

Zusammenfassung: Digitale Geländemodelle (DGMe) sind in den letzten Jahren wieder in den Mittelpunkt des Interesses gerückt. Sie sind für die Modellierung von hochwassergefährdeten Bereichen und für das Management tatsächlicher Hochwässer unentbehrlich. DGMe sind außerdem ein wichtiger Basisdatenbestand für vielseitige Aufgabenstellungen, die mit Geo-Informationssystemen (GISen) gelöst werden. Gegenwärtig werden in vielen Ländern große Datenbestände aufgebaut, aber sehr selten detaillierte Qualitätsmaße beigelegt. In diesem Beitrag werden praxisbezogene Qualitätsmaße präsentiert. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Originaldaten und das DGM – unabhängig von der angewendeten Interpolationsmethode – zur Verfügung stehen. Die erwähnten Qualitätsmaße wurden für DGMe ermittelt, die einerseits aus photogrammetrischen Daten und andererseits aus Laserscanner-Daten abgeleitet wurden. Aus diesem Vergleich ergeben sich interessante Empfehlungen für die Praxis.

1 Vorbemerkungen

Digitale Geländemodelle (DGMe) wurden vor nahezu 50 Jahren von C. Miller, Massachusetts Institute of Technology, Boston, USA, „erfunden“. Die folgenden Jahrzehnte waren vor allem von der Entwicklung der (photogrammetrischen) Datenerfassungstechniken und der adäquaten Software geprägt. Heutzutage spielen DGMe als Basisdatenbestand für Geo-Informationssysteme (GISe) eine große Rolle. In den letzten Jahren etablierte sich eine neue Datenerfassungstechnik, das flugzeuggetragene (*airborne*) Laserscanning (ALS).

Um der großen Bedeutung der DGMe Rechnung zu tragen, benötigt man Qualitätsmaße für DGMe. Faustformeln zur groben Genauigkeitsabschätzung sind für die Planung von DGM-Projekten von großer Bedeutung. Sie sind in einer mehr oder weniger ausgereiften Form vorhanden (z.B. KRAUS, 2004). Wenn die Modellbildung mit Kleinste-Quadrate-Ansätzen erfolgt, kann – entsprechende Software vorausgesetzt – die Genauigkeit der aus den erfassten Originaldaten interpolierten Punkte mittels des Fortpflanzungsgesetzes von Varianzen und Kovarianzen berechnet werden. Das Fortpflanzungsgesetz von Varianzen und Kovarianzen hat aus der Sicht des Anwenders aber den Nachteil einer sogenannten Blackbox. Der Anwender bekommt zwar detaillierte Genauigkeitsmaße, er erfährt aber nicht die einzelnen Einflussfaktoren.

Es gibt noch sehr wenig Literatur darüber, wie für DGMe im *Postprocessing* detaillierte Genauigkeitsangaben gefunden werden können. Im Folgenden werden in Stufen Genauigkeitsmaße abgeleitet. Ihre Entstehung ist leicht nachvollziehbar und sehr transparent. Die Ergebnisse können attraktiv visualisiert werden. Die vorgeschlagenen Methoden können auch für DGMe angewendet werden, die bereits – mit unterschiedlicher Software – gebildet wurden. Bei der Beschreibung der Methode unterstellen wir allerdings ein hybrides DGM, das aus einem regelmäßigen Raster mit eingeketteten Geländekanten besteht (KRAUS, 2000).

¹ Alle am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.) der TU Wien, Gußhausstraße 27-29, e-mails: kk@ipf.tuwien.ac.at, ma@ipf.tuwien.ac.at, cb@ipf.tuwien.ac.at

² Christian Doppler-Labor am I.P.F., e-mail: gm@ipf.tuwien.ac.at

2 Theorie

Wir gehen davon aus, dass die Stützpunkte, aus denen das DGM abgeleitet wurde, noch verfügbar sind. Bei photogrammetrischen Daten sollen etwaige grobe Messfehler bereits eliminiert sein. Bei ALS-Daten sollen die Nicht-Bodenpunkte, das sind Punkte auf Bäumen und Häusern, bereits herausgefiltert sein. Die Genauigkeiten der Stützpunkte werden empirisch aus dem Datenmaterial bestimmt; zusätzlich ist aber eine grobe Schätzung der Höhengengenauigkeit für die Stützpunkte, die mit $\sigma_{a\text{ priori}}$ bezeichnet wird, wertvoll.

Im Folgenden werden ein empirisch-stochastischer Ansatz und ein geometrie-basierter Ansatz vorgestellt.

2.1 Empirisch-stochastischer Ansatz

Dem Abschnitt 2.1.2 über die Grundgedanken wird ein Abschnitt über die Krümmung vorgestellt.

2.1.1 Krümmung $1/r$

Die Qualität von DGMen wird stark von der Krümmung des Geländes beeinflusst. Sie wird deshalb in jedem Gitterpunkt berechnet. Es wurde ein Algorithmus implementiert, der mit Hilfe der Differentialgeometrie die maximale Krümmung unter Beachtung der Geländekanten ermittelt (Details findet man im Appendix A der Veröffentlichung (KRAUS ET AL., 2004)).

Abb. 1 zeigt das auf diese Weise berechnete Krümmungsbild eines DGMs, das aus ALS-Daten gewonnen wurde. Die Gitterweite des DGMs beträgt 1m. Die Krümmung $1/r_i$ ($r \dots$ Krümmungsradius) variiert zwischen $-0,61\text{m}^{-1}$ und $0,78\text{m}^{-1}$. Das Krümmungsbild veranschaulicht umfassend die Geomorphologie der Geländeoberfläche (Abb. 2 zeigt das dazugehörige Orthophoto). In den landwirtschaftlich genutzten Flächen ist die Krümmung sehr gering, in den besiedelten und bewaldeten Flächen deutlich größer. Die stärkste Krümmung tritt in der Umgebung der Geländekanten auf, die im ALS-DGM nicht explizit modelliert wurden.

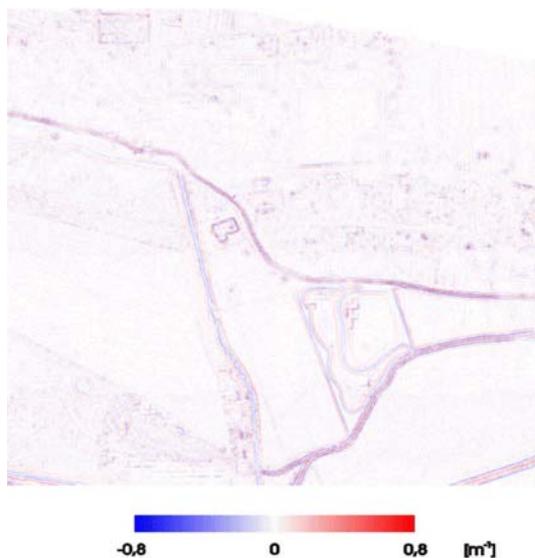


Abb. 1: Maximale Krümmung $1/r_i$ in jedem Gitterpunkt eines ALS-DGMs



Abb. 2: Orthophoto

2.1.2 Grundgedanken

Viele empirische Untersuchungen haben in der Vergangenheit gezeigt, dass die Genauigkeit des DGMs nur unwesentlich von der Interpolationsmethode abhängig ist. Die unterschiedlichen Interpolationsmethoden wirken sich aber sehr auf die geomorphologische Qualität der interpolierten Oberfläche und auf die Qualität der mit der Interpolation in der Regel verbundenen Filterung aus.

Außerdem kann für die Genauigkeitsabschätzung durchaus ein einfacherer Algorithmus als für die Berechnung des DGMs gewählt werden. Wir wählen für die Genauigkeitsabschätzung die gleitende Schrägebene (KRAUS, 2000). In jeden Gitterpunkt des DGMs wird eine schräge Ebene gelegt (Abb. 3). Der Einflussbereich für jeden Gitterpunkt ergibt sich aus der Flächengröße A_i . Die Bereiche A_i werden mit Hilfe der Krümmung $1/r_i$ so bestimmt, dass das ebene Flächenelement die gekrümmte Oberfläche in der Umgebung des jeweiligen Gitterpunktes innerhalb einer vorgegebenen Approximationsgenauigkeit dZ_{\max} annähert (z.B. BRIESE & KRAUS, 2003):¹

$$A_i = dZ_{\max} 8r_i \cos^3 \alpha_i \quad (1)$$

α_i ... Geländeneigung im jeweiligen Gitterpunkt

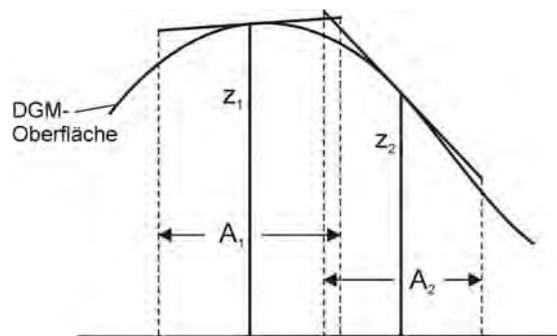


Abb. 3: Zwei DGM-Gitterpunkte mit approximierenden ebenen Flächenelementen A_i

Mit Hilfe des jeweiligen Flächenelementes A_i kann aus dem Original-Datensatz der Bodenkpunkte die Anzahl n_i entnommen werden, die für die Interpolation der Gitterhöhe Z_i repräsentativ ist. Ein interessantes Zwischenergebnis ist die Punktdichte:

$$\bar{n}_i = n_i / A_i \quad (2)$$

Die Genauigkeit $\sigma_{Z,\text{DGM}}$ einer Gitterhöhe Z_i folgt aus dem Fehlerfortpflanzungsgesetz (KRAUS ET AL., 2004):

$$\sigma_{Z,\text{DGM}} = \sigma_{Z,\text{Original},i} / \sqrt{n_i} \quad (3)$$

¹ Die Bereiche A_i können sehr aufwendig bestimmt werden. Die theoretisch beste Lösung wäre, aus den beiden Hauptkrümmungen und den Hauptkrümmungsrichtungen im jeweiligen Gitterpunkt ein ebenes Flächenelement A_i mit einer elliptischen Begrenzung zu ermitteln. Außerdem sollten die Bereiche, die – vom Gitterpunkt aus gesehen – auf der anderen Seite von Geländekanten liegen, nicht in die Flächengröße A_i eingehen. Im Abschnitt 3. wird die Implementierung diskutiert. Die praktischen Beispiele in diesem Aufsatz sind mit der Lösung entstanden, dass die Bereiche A_i quadratisch angenommen wurden.

$\sigma_{Z,Original,i}$ ist die repräsentative Höhengenaugigkeit eines Original-Bodenpunktes. Die Beziehung (3) ist für horizontale Flächen, wo die Interpolation nichts anderes als das arithmetische Mittel ist, unmittelbar einsichtig; sie gilt aber auch für ausgleichende Schrägebenen (KRAUS ET AL., 2004).

$\sigma_{Z,Original,i}$ wird aus den Original-Bodenpunkten empirisch bestimmt. Auf diese Weise geht die unterschiedliche Qualität der Original-Bodenpunkte und auch die Qualität des zu testenden DGMs in das Genauigkeitsmaß (3) ein. $\sigma_{Z,Original,i}$ wird als RMS (*root mean square error*) aus den Diskrepanzen zwischen den Höhen der Original-Bodenpunkte und den an diesen Stellen interpolierten Höhen im DGM berechnet. Für jedes Flächenelement A_i bekommt man einen repräsentativen Wert $\sigma_{Z,Original,i}$. Sollte dieser Wert geringer als der im Abschnitt 2 erwähnte Wert $\sigma_{a\text{ priori}}$ ausfallen, wird man ihn in der Formel (3) durch $\sigma_{a\text{ priori}}$ ersetzen.

2.1.3 Beispiele

Für den Ausschnitt der Abb. 1 bzw. 2 variieren – bei Verwendung einer Approximationsgenauigkeit dZ_{\max} von 5cm – die Flächenelemente A_i zwischen 2m^2 und 512m^2 ; der quadratische Mittelwert beträgt 36m^2 .

Die Punktdichte \bar{n}_i (2) ist in der Abb. 4 dargestellt. Die maximale Punktdichte beträgt $4,64$ Punkte/ m^2 . Die hohe Punktdichte tritt an den Überlappungszonen der ALS-Streifen auf. In den weißen Bereichen gibt es keine Bodenpunkte: Die Originalpunkte lagen dort auf Gebäuden und Bäumen (Vergleiche Abb. 2); sie wurden bei der Bildung des DGMs mit dem Programm SCOP herausgefiltert; außerdem gibt es kleine Wasserflächen, in denen der Laserstrahl nicht reflektiert wurde (<http://www.inpho.de>, http://www.ipf.tuwien.ac.at/products/produktinfo/scop/englisch/scop_e.html).

Die aus den Diskrepanzen zwischen den Höhen der Originaldaten und den an diesen Stellen interpolierten Höhen im DGM berechneten Werte $\sigma_{Z,Original,i}$ sind für unser Test-ALS-DGM in der Abb. 5 dargestellt. Dieses Fehlermaß variiert vor allem abhängig von der Qualität der Datenerfassung. $\sigma_{Z,Original,i}$ erreicht einen Maximalwert von $\pm 52\text{cm}$. Der quadratische Mittelwert beträgt $\pm 5,1\text{cm}$. In 64% der Fälle wurde der RMS durch die Standardabweichung $\sigma_{a\text{ priori}}$, die mit $\pm 5\text{cm}$ angenommen wurde, ersetzt. In Bereichen ohne Bodenpunkte wurde kein $\sigma_{Z,Original,i}$ angegeben; sie sind in schwarz markiert.

Das wichtigste Ergebnis sind die für jeden Gitterpunkt des DGMs geschätzten Standardabweichungen $\sigma_{Z,DGM}$, die mittels der Beziehung (3) berechnet wurden. Die Genauigkeit variiert zwischen $\pm 4\text{mm}$ und $\pm 2,15\text{m}$. Der Medianwert beträgt $2,1\text{cm}$. Abb. 6 zeigt eine Visualisierung unseres Testgebietes.

Die „schwarzen“ Bereiche in der Abb. 6, das sind Bereiche mit größeren Datenlöchern, werden bei der DGM-Berechnung mehr oder weniger gut überbrückt. Die mit Überbrückungen verbundenen Gefahren sind mit Qualitätsparametern anzuzeigen. Der bisher besprochene empirisch-stochastische Ansatz ist dafür weniger geeignet. Er ist in den stützpunktlosen Bereichen durch einen geometrie-basierten Ansatz zu ersetzen.

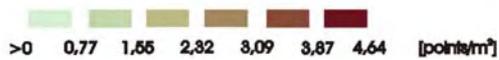
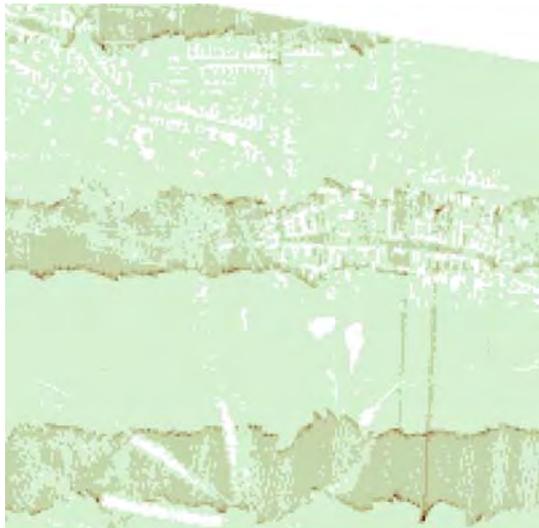


Abb. 4: Punktdichte \bar{n}_i der Original-Bodenpunkte, aus denen das ALS-DGM abgeleitet wurde¹. In weiß markierten Bereichen gibt es keine Original-Bodenpunkte.

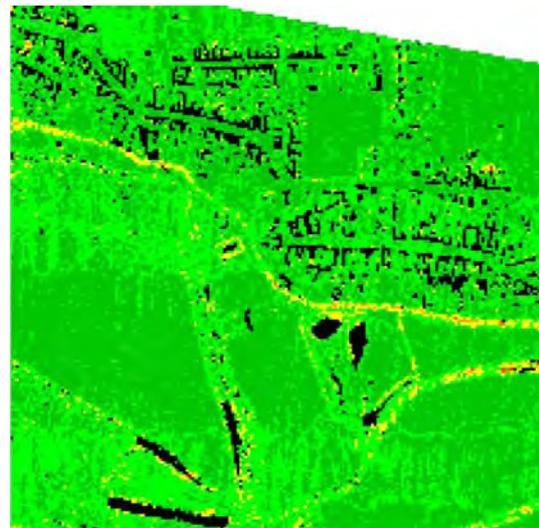


Abb. 5.: Empirische Genauigkeit $\sigma_{z, \text{Original}, i}$ der Original-Bodenpunkte in Relation zum ALS-DGM². In schwarz markierten Bereichen gibt es keine Bodenpunkte.

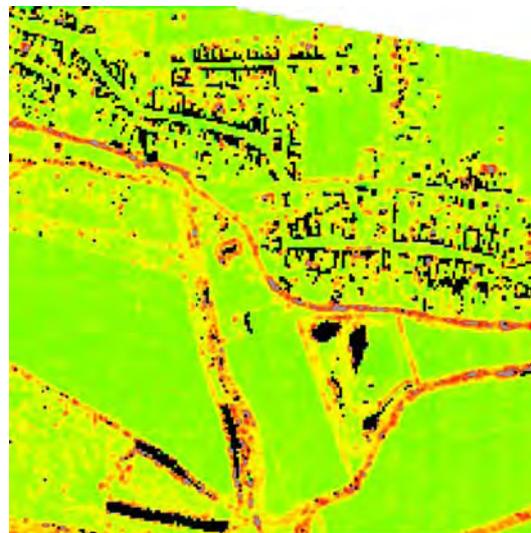


Abb. 6: Standardabweichungen $\sigma_{z, \text{DGM}}$ in jedem Gitterpunkt des ALS-DGMs. Bereiche ohne Original-Bodenpunkte wurden schwarz markiert.

¹ Für die Berechnung der Punktdichte wurde eine Implementierung benutzt, die ein früheres Konzept verwirklicht hat. Es wurden über das gesamte Gebiet gleich große Flächenelemente von 25m² gelegt.
² In Fortsetzung der Fußnote zur Abb. 4 wurde der RMS für die 25m² großen Flächenelemente ermittelt.

2.2 Geometrie-basierter Ansatz

Aus geometrischer Sicht ist zunächst von Bedeutung, wie weit der nächstliegende (Original-) Bodenpunkt vom jeweiligen interpolierten DGM-Gitterpunkt entfernt ist.

2.2.1 Entfernung d_s des nächstliegenden Stützpunktes vom jeweiligen DGM-Gitterpunkt

Mit Hilfe der Chamfer-Funktion der digitalen Bildverarbeitung lassen sich diese kürzesten Entfernungen d_s rationell ermitteln (BORGEFORS, 1986). Für das eingeführte Testbeispiel zeigt Abb. 7 diese Information. In Bereichen, in denen Datenlöcher vorhanden sind, sind diese kürzesten Entfernungen d_s besonders groß. Die maximale kürzeste Entfernung beträgt 19m.

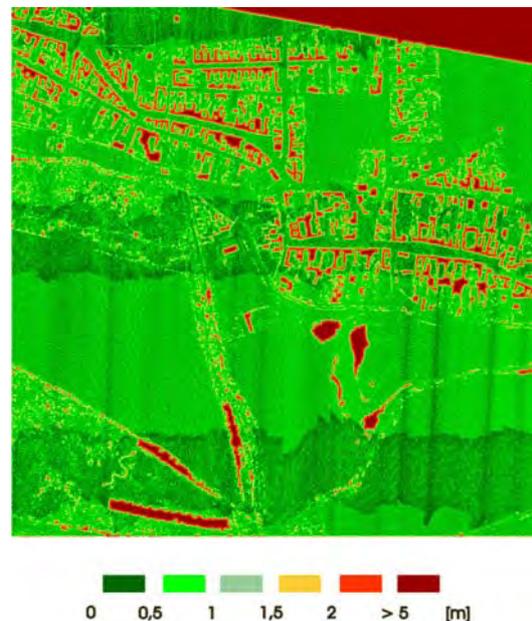


Abb. 7: Entfernungen des nächstliegenden Stützpunktes von den jeweiligen DGM-Gitterpunkten

2.2.2 Interpolationsfehler dZ in stützpunktlosen Bereichen mit Beispielen

Eine der möglichen Konstellationen, die in stützpunktlosen Bereichen auftreten können, ist in der Abb. 8 skizziert: Der stützpunktlose Bereich wird von der DGM-Software mehr oder weniger geradlinig überbrückt. Tatsächlich soll das Gelände auf der linken Seite eine Krümmung $1/r$ besitzen. Dadurch entsteht ein Interpolationsfehler dZ im DGM-Gitterpunkt, der vom nächstliegenden Stützpunkt um d_s entfernt ist:

$$dZ \approx \frac{d_s^2}{2r} \quad (4)$$

Mit der Krümmungsinformation (Abb. 1) und der d_s -Information (Abb. 7) erhält man mit der Beziehung (4) das in der Abb. 9 dargestellte Ergebnis. Der Interpolationsfehler variiert zwischen $-8,5\text{m}$ und $7,1\text{m}$. In den Bereichen mit hoher Punktdichte, in denen die Stützpunkte Abstände von etwa 1m besitzen, ist der Interpolationsfehler dZ völlig unbedeutend. In den stützpunktlosen Bereichen, in denen wir keine statistische Genauigkeit des DGMs erhalten

haben (Abb. 5), ist die Kenntnis des Interpolationsfehlers dZ von großer Bedeutung. Falls d_s größer als der Krümmungsradius r werden sollte, ist auf die Angabe eines Interpolationsfehlers zu verzichten. Diese Bereiche sind als völlig unbrauchbar zu markieren.

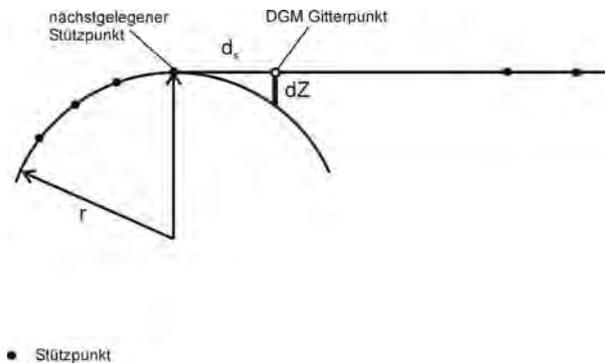


Abb. 8: Interpolationsfehler dZ im Stützpunktlosen Bereich

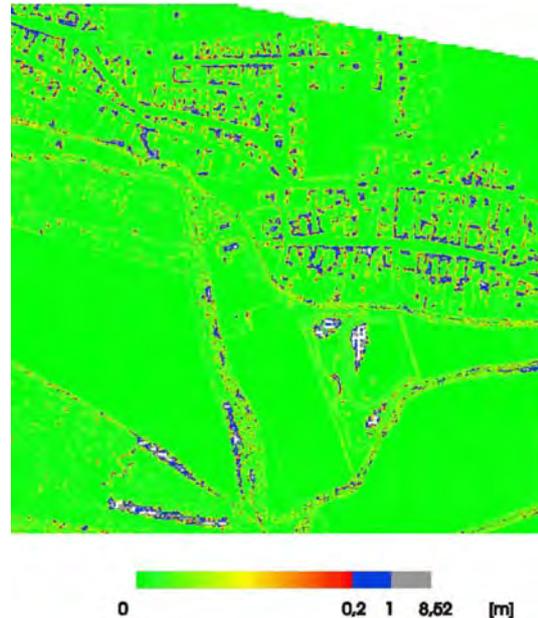


Abb. 9: Geometrische Genauigkeit eines ALS-DGMs. In den weißen (unbrauchbaren) Bereichen ist die kürzeste Entfernung d_s größer als der Radius der Krümmung.

3 Implementierung

Die in den vorangegangenen Abschnitten besprochenen Qualitätsmaße werden derzeit im DGM-Programmsystem SCOP++ umgesetzt. Dabei wurde generell eine Einteilung in Qualitätsmaße der Originaldaten und der daraus abgeleiteten DGMe vorgenommen. Grundsätzlich können alle Qualitätslayer einerseits als digitale Modelle im SCOP DGM-Format RDH (*Random Digital Height*) sowie als digitale Karten (Rasterbilder) abgelegt werden. Die beiden Begriffe werden daher im Folgenden als Synonym betrachtet. Vor allem im Hinblick auf eine Archivierung der einzelnen Qualitätslayer zusätzlich zum eigentlichen DGM in einer topographischen Datenbank ist eine Speicherung im DGM-Format von Vorteil.

Die Beschaffenheit der Originaldaten kann durch Modelle der Datendichte (*density model*, Abb. 4) und des Stützpunktabstandes (*distance model*, Abb. 7) beschrieben werden. Ihre Ableitung erfolgt auf Basis eines regelmäßigen Rasters (Analyseeinheiten), wobei die Rasterweite unabhängig von der DGM-Gitterweite ist.

Die Qualität der abgeleiteten DGMe kann in Form von Modellen der inneren und äußeren Genauigkeit berechnet werden. Die Auflösung dieser Modelle entspricht dabei stets der Gitterweite des zu Grunde liegenden DGMs. Die innere Genauigkeit (*precision*) kann auf unterschiedliche Weise beschrieben werden. Einerseits kann für jeden Gitterpunkt der RMS, der Medianwert oder das maximale Residuum angegeben werden. Weiters stehen die im Abschnitt 2 vorgestellten Methoden (empirisch-stochastischer und geometrie-basierter Ansatz) zur Verfügung. Die Ableitung der äußeren Genauigkeit erfolgt durch Vergleich mit unabhän-

gigen Datensätzen, entweder modellhaft bezogen auf ein Referenz-DGM oder diskret auf Basis von beliebig verteilten Kontrollpunkten.

Der Einfluss der Originaldaten auf das Genauigkeitsmaß des einzelnen Gitterpunktes wird dabei stets durch die im Abschnitt 2.1.2 eingeführten Flächenelemente A_i begrenzt, wobei die Krümmungsellipse durch eine eingeschriebene Raute approximiert wird. Das Einsortieren der Originalpunkte in die Flächenelemente A_i läuft für jeden Punkt auf einen Point-In-Polygon-Test hinaus und kann daher nicht mit den sehr schnellen Algorithmen der rasterbasierten Bilddatenverarbeitung erfolgen. Dieser Einfluss auf die Rechenzeiten bleibt noch zu testen.

4 Anwendung

Am I.P.F. werden gegenwärtig mehrere Pilotprojekte bearbeitet. Die Anwender verlangen zunehmend die Qualitätsmaße. Wir beschränken uns in diesem Beitrag auf das Projekt Pulkatal in Niederösterreich. Das Projekt wurde zur Modellierung der Hochwassergefährdungszonen initiiert. Dieses Projekt ist für diese Veröffentlichung besonders interessant, weil von einem verhältnismäßig großen Gebiet sowohl ein ALS-DGM als auch ein photogrammetrisches DGM erstellt wurden.

4.1 Laserscanner-Projekt

Für DGMe, die aus ALS-Daten gewonnen werden, sind die vorgestellten Qualitätsmaße von besonderer Bedeutung. Das flugzeuggetragene Laserscanning liefert zwar eine sehr große Dichte von Bodenpunkten, es ist aber vieles dem Zufall überlassen. Es kommen auch sehr große Bereiche ohne Bodenpunkte vor. Eine nachträgliche Analyse der Daten und der daraus abgeleiteten DGMe ist unerlässlich.

Die Abb. 1, 2, 4, 5, 6, 7 und 9 sind Ausschnitte aus dem ALS-DGM Pulkatal. Die Flughöhe betrug 1000m. Für die Datenerfassung wurde ein Optech-Scanner verwendet. Das DGM wurde mit der in SCOP realisierten robusten Interpolation nach kleinsten Quadraten abgeleitet. Die Filterung wurde mit schiefer und exzentrischer Gewichtsfunktion durchgeführt (KRAUS & PFEIFER, 1998). An den Geländekanten wurde kein besonderes Modellierungsverfahren eingesetzt.

4.2 Photogrammetrie-Projekt

Der Flug wurde mit einer 15cm-Kamera in einem Bildmaßstab 1:7500 durchgeführt. Die Daten für das photogrammetrische DGM wurden mit analytischer Photogrammetrie erfasst. Der Operateur hat in einem 25m-Raster, das in besiedelten Gebieten und in Gebieten mit hoher Vegetation mehr oder weniger stark abgewandelt werden musste, die Geländehöhen gemessen. Zusätzlich hat er Geländekanten im Stereomodell digitalisiert. Die Faustformeln (z.B. KRAUS, 2004) zur Genauigkeitsabschätzung des photogrammetrischen DGMS liefern einen Wert für die Höhengenaugigkeit von $\pm 17\text{cm}$.

Das photogrammetrische DGM wurde in gleicher Weise wie das ALS-DGM analysiert. Die Punktdichte ist deutlich geringer als die Punktdichte der ALS-Daten (Abb. 4). Sie beträgt in den Bereichen mit reiner Rastermessung nur 0,0016 Punkte/m². Die empirisch geschätzte Standardabweichung $\sigma_{Z, \text{Original}, i}$ der Originaldaten, deren quadratischer Mittelwert bei den ALS-Daten $\pm 5,1\text{cm}$ beträgt (Abb. 5), erreicht bei den photogrammetrischen Daten einen Wert von $\pm 15\text{cm}$. Aus dem photogrammetrischen DGM wurde auch die Krümmung abgeleitet. Die

Krümmungswerte des photogrammetrischen DGMs sind etwa um 20% geringer als die des ALS-DGMs: Die sehr hohe Punktdichte der ALS-Daten führt zu einem formreicheren DGM im Vergleich zum photogrammetrischen DGM.

Die mittels der Beziehung (3) geschätzte Standardabweichung $\sigma_{Z,DGM}$ für jeden Gitterpunkt variiert zwischen $\pm 2,1\text{cm}$ und $\pm 1,9\text{m}$; der Medianwert beträgt 14cm . Diese Werte sind deutlich schlechter als die entsprechenden Werte des ALS-DGMs. Ein Vergleich der Abb. 6 ($\sigma_{Z,DGM}$ des ALS-DGMs) mit der Abb. 10 ($\sigma_{Z,DGM}$ des photogrammetrischen DGMs) zeigt im Detail die schlechteren Genauigkeiten der analytischen Photogrammetrie im Vergleich zum flugzeuggetragenen Laserscanning.

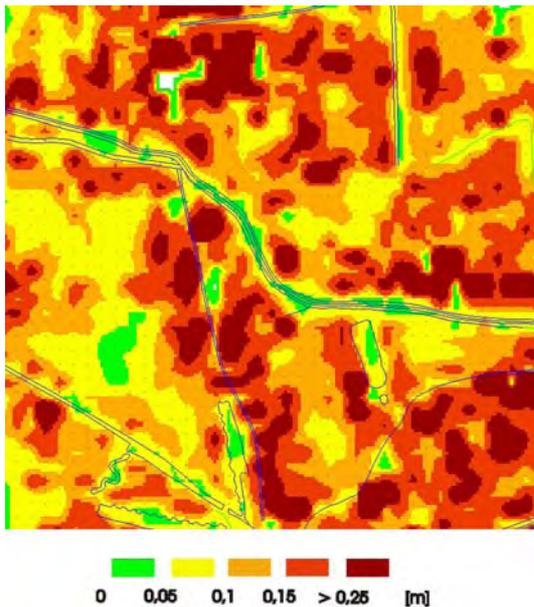


Abb. 10: Genauigkeit $\sigma_{Z,DGM}$ des photogrammetrischen DGMs unter Einbeziehung der Geländekanten (weiße Bereiche: keine Originaldaten)

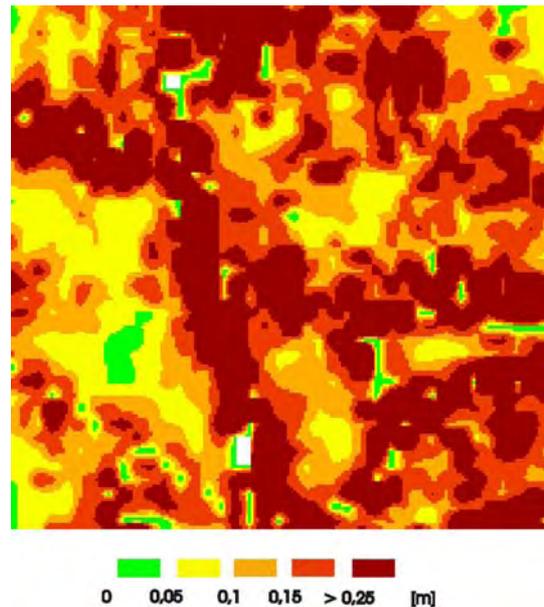


Abb. 11: Genauigkeit $\sigma_{Z,DGM}$ des photogrammetrischen DGMs ohne Einbeziehung der Geländekanten (weiße Bereiche: keine Originaldaten)

Mit den im Abschnitt 2.1.2 vorgestellten Methoden zur Qualitätsüberwachung können auch interessante Detailfragen beantwortet werden. Mit dem Vergleich der Abb. 10 und 11 wurde zum Beispiel die Frage beantwortet, wie viel die manuell digitalisierten Geländekanten im optischen Stereomodell zur Genauigkeitssteigerung beitragen. Die Genauigkeitssteigerung ist beachtlich: die Extremwerte zwischen $\pm 2,5\text{cm}$ und $\pm 4,5\text{m}$ verbessern sich auf $\pm 2,1\text{cm}$ und $\pm 1,9\text{m}$; der Medianwert verbessert sich von 18cm auf 14cm .

Für das photogrammetrische DGM werden keine Interpolationsfehler dZ (Abschnitt 2.2.2) präsentiert. Ihre Angabe ist in der Regel bei photogrammetrischen DGMen nicht erforderlich, da in photogrammetrischen DGMen der Operateur die gefährlichen Datenlöcher, wie sie bei der ALS-Datenerfassung manchmal vorkommen, mehr oder weniger vermeiden kann.

4.3 Vergleich der beiden Projekte und der beiden konkurrierenden Technologien

Im vergangenen Abschnitt 4.2 wurden bereits sehr viele wertende Aussagen zu den beiden konkurrierenden Technologien, der Stereophotogrammetrie und dem flugzeuggetragenen

Laserscanning, gemacht. Abb. 12 zeigt die Differenzen zwischen dem ALS-DGM und dem photogrammetrischen DGM. Daraus und aus einigen grundsätzlichen Überlegungen können folgende zusätzlich wertende Aussagen gemacht werden:

- Das ALS-DGM weist in großen Bereichen eine wesentlich bessere Genauigkeit als das photogrammetrische DGM auf (Grund: Die ALS-Punktdichte ist sehr hoch, in landwirtschaftlich genutzten Flächen gibt es häufig sehr wenig Textur für das stereoskopische Messen).
- Die Geländekanten sind im photogrammetrischen DGM wesentlich besser modelliert als im ALS-DGM (mit einer besseren Modellierung der Geländekanten in den ALS-Originaldaten wird dieser Mangel bald behoben sein (BRIESE, 2004)).
- Im photogrammetrischen DGM treten Höhenversetzungen an den Grenzen der Stereomodelle auf, die von Restfehlern der absoluten Orientierung herrühren.
- Im ALS-DGM treten Höhenversetzungen an den Grenzen der verschiedenen Bewirtschaftungsarten auf (im dichten hohen Getreide wird nicht der Boden sondern die Oberfläche des Getreidefeldes modelliert).
- Im ALS-DGM gibt es hin und wieder unkontrolliert auftretende große Datenlöcher mit unbrauchbaren DGM-Ergebnissen.
- Im ALS-DGM gibt es unmotiviert wellenhafte Strukturen, die auf Unzulänglichkeiten des Aufnahmesystems hinweisen und die voraussichtlich in absehbarer Zeit behoben werden können.

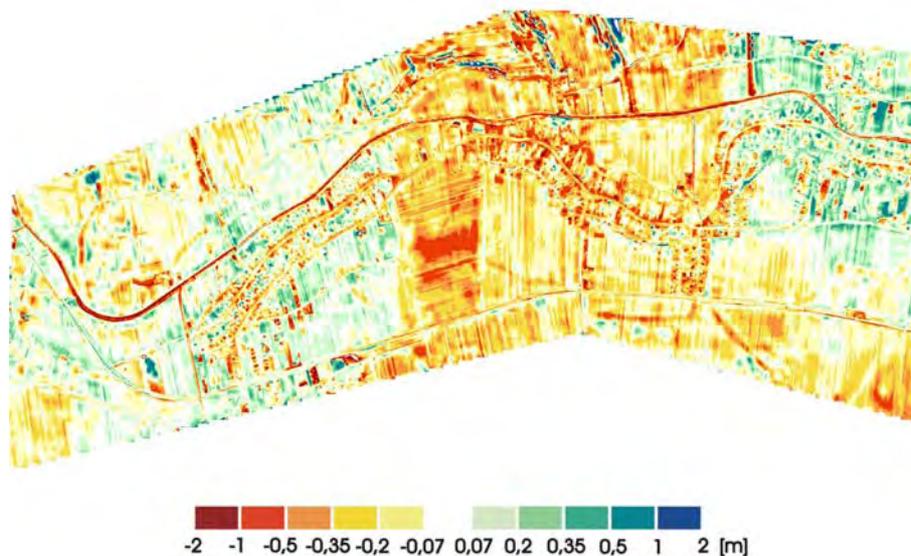


Abb.12: Differenz zwischen dem ALS-DGM und dem photogrammetrischen DGM

Die Qualität der DGMe muss in Zukunft im Detail überwacht und die Ergebnisse dieser Qualitätskontrolle müssen dem Anwender der DGMe adäquat zur Verfügung gestellt werden. Dieser Aufsatz wollte einen Beitrag dazu leisten.

5 Literaturverzeichnis

BORGEFORS, G., 1986: Distance Transformations in Digital Images. Computer Vision, Graphics and Image Processing, CVGIP 34 (3), S. 344-371.

- KRAUS, K., PFEIFER, N., 1998: Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. ISPRS-Journal, Vol. 53, S. 193 - 203.
- KRAUS, K., 2000: Photogrammetrie, Band 3, Topographische Informationssysteme, 1. Auflage, Dümmler.
- KRAUS, K., 2004: Photogrammetrie, Band 1, Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen, 7. Auflage, Walter de Gruyter.
- KRAUS, K., BRIESE, C., ATTWENGER, M., PFEIFER, N., 2004: Quality Measures for Digital Terrain Models. Proceedings of the XXth Congress of ISPRS in Istanbul, im Druck.
- BRIESE, C., KRAUS, K., 2003: Datenreduktion dichter Laser-Geländemodelle. zfv, Heft 5, 128. Jahrgang, S. 312-317.
- BRIESE, C., 2004: Three Dimensional Modelling of Break-Lines from Airborne Laser Scanner Data. Proceedings of the XXth Congress of ISPRS in Istanbul, im Druck.

Danksagung

Das Projekt wird vom Österreichischen Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung finanziell unterstützt (Projekt Nr. 15789).

GIS gestützte Methoden zur Erfassung von Waldressourcen in der Mongolei im Rahmen der Entwicklungszusammenarbeit

B. Meissner, D. Wyss¹
M. Zakrzewski, S. Teusan²
H. Hoffmann³

Zusammenfassung: In diesem Beitrag werden die GIS gestützten Methoden zur qualitativen und quantitativen Erfassung der Waldressourcen in der östlichen Pufferzone des Khan Khentii-Schutzgebietes in den Einzugsgebieten von Mongonmorit und Basherit in der Nord-Mongolei vorgestellt. Die dargelegten Ergebnisse stellen eine Weiterentwicklung der Erfassungsmethoden aus den Jahren 2001 und 2002 dar, die in der westlichen Pufferzone des Schutzgebietes durchgeführt wurden (22. Jahrestagung der DGPF, 2002). Die kontinuierliche Aus- und Weiterbildung von lokalen Experten in den Bereichen Fernerkundung und GIS zur Unterstützung der Forst- und Naturschutz-Management-Planung (FNMP) hat innerhalb des GTZ-Projektes "Schutz und Bewirtschaftung natürlicher Ressourcen (SBNR)" eine hohe Priorität. Die Technische Fachhochschule Berlin (TFH) arbeitet im Rahmen von Hochschulverträgen mit der Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) in enger Kooperation mit dem FMPC (Forest Management Project Center) in Ulaanbaatar und FOREM International, Karlsruhe zusammen. Arbeitsschwerpunkte lagen im Sommer 2003 im Bereich der satellitenbildgestützten Forstkartierung, auf deren Basis eine prästratifizierte terrestrische Waldinventur auf Stichprobenbasis (6-Baum-Stichprobe) durchgeführt wurde.

1. Ausgangssituation

Die Problematik der aktuellen und historischen Waldzerstörung in der Mongolei wurde bereits ausführlich beschrieben (Meissner & Wyss, 2002). Der anthropogene Druck nimmt auf die Waldressourcen in der Mongolei zu. Dazu gehören z. B.: die unregelmäßige und illegale Holznutzung, unkoordinierte Ernte der Waldnebenprodukte (Beeren, Pilze, Abwurfstangen), Abbau der Bodenschätze, die in den entlegenen Waldgebieten ihr Vorkommen haben. Diese Aktivitäten führen direkt oder indirekt zu beträchtlichen Waldarealverlusten in Folge immer häufiger auftretender Waldbrände und zahlreicher Insektenkalamitäten. Zudem führt die Migration der Landbevölkerung in die Hauptstadt Ulaanbaatar zu einem höheren Bedarf an natürlichen Ressourcen (insbesondere Bauholz) in der direkten Nähe zu dieser Metropole. Ein Verantwortungsbewusstsein für natürliche Ressourcen ist noch wenig entwickelt, wenn auch die voranschreitende Umweltzerstörung mit ihren negativen Auswirkungen allgemein wahrgenommen wird. Das Mongolian Academy of Sciences (MAS) ist für angewandte Forschung zuständig. Planung und Umsetzung von Waldmanagement, Aufforstungsmaßnahmen und Waldinventuren liegen im Zuständigkeitsbereich des Ministry of Nature and Environment (MNE) und werden nur noch am Forest Management Project Center (FMPC) in Ulaanbaatar auf der Basis einer seit 1958 auf sowjetische Muster und Vorgehensweisen basierende systematische Wald Management Planung durchgeführt. Die regionale Umsetzungsebene wurde aufgelöst und muss in den Aimags (zweite administrative Ebene nach dem Staat) erst

¹ Prof. Dr. Bernd Meissner, Daniel Wyss, geo3 (Institut für Geoforschung der TFH Berlin), Luxemburger Str. 10, D- 13353 Berlin, e-mail: meissner@tfh-berlin.de, wyss@tfh-berlin.de

² Marek Zakrzewski, Stefan Teusan, Teusan & Zakrzewski GbR, FOREM International, Klauprechtstr. 5, D- 76137 Karlsruhe, e-mail: Zakrzewski@forem.de, Teusan@forem.de

³ Hans Hoffmann, GTZ Ulaanbaatar, e-mail: gtznaturecon@magicnet.mn

wieder aufgebaut werden. So finden zurzeit die Forstingenieur-Absolventen der National University of Mongolia (NUM) mit Schwerpunkten im Bereich Ökologie und Landschaftsplanung keinen adäquaten Arbeitsplatz (Teusan, 2000). Kennzeichnend ist, dass nur 5% der Fachmitarbeiter des MNE Forstingenieure sind (Batsukh, 2004). Ziel ist es, die hochmotivierten aber überforderten Mitarbeiter des FMPC sowie die inzwischen entstandenen Privatfirmen mit neuer Arbeitsmethodik zu unterstützen und fortzubilden. Darüber hinaus soll in Pilot-Aimags (z. B. Selenge) durch praktische Anwendung das Interesse an einer funktionierenden Forst- und Naturschutzplanung verstärkt werden. Seit 1990 befindet sich auch die mongolische Waldgesetzgebung in einem kontinuierlichen Transformationsprozess. Auf der Grundlage des neuen Waldgesetzes von 1995 könnten die Bemühungen um ein Nationales Forst Programm (NFP) eine geeignete Plattform zur Verbesserung der sozioökonomischen und politischen Rahmenbedingungen im forstlichen Sektor bilden und eine zwingende Voraussetzung für die mittel- und langfristige Umsetzung nachhaltiger Waldmanagementansätze schaffen. Hierzu gehören institutionelle Reformen im Forstsektor, eine Verbesserung der Ausbildungsstrukturen im Forstbereich ("capacity building"), Monitoring und Schutz der Waldressourcen sowie strategische Maßnahmen, wie z.B. die Einführung von FE und GIS zur Erfassung und Bewertung der gegenwärtigen Waldbestände und die methodische Modifizierung von Waldinventuren in ausgewählten Modellgebieten.

2. Das GTZ-Projekt "Schutz und Bewirtschaftung natürlicher Ressourcen"

Im Jahre 1998 wurde das GTZ-Projekt "Nachhaltige Waldnutzung, Ressourcenschutz und Ausbildung im Forstbereich" geprüft. Die aufgrund von Umstrukturierungsmaßnahmen auf Geberseite folgende Strategiediskussion zwischen der GTZ, dem BMZ und dem Partner über eine Schwerpunktbildung im "grünen Sektor" verdeutlichte die essentielle Bedeutung der nachwachsenden Rohstoffe im Vergleich zu den vergänglichen Bodenschätzen für das im Aufbau befindlichen Transformationsland Mongolei. Folglich legt die Konzeption der neuen Projektphase "Schutz und Bewirtschaftung natürlicher Ressourcen (SBNR)", die Mitte 2002 begann, weiterhin einen Schwerpunkt auf die nachhaltige Waldbewirtschaftung in der Randzone des Khan Khentii-Schutzgebietes. In Anlehnung an den Formulierungsprozess des NFP wurde im Sommer 2003 in Zusammenarbeit mit dem FMPC und FOREM International in der östlichen Randzone des Schutzgebietes (Einzugsbereich von Mongonmorit) eine prästratifizierte terrestrische Waldinventur auf Stichprobenbasis durchgeführt. Grundlage hierfür bildete die visuelle Neuinterpretation der bestehenden Forsteinrichtungskarte auf der Basis von aktuellen Satellitenbilddaten. Neben einer Stärkung der sich im Aufbau befindenden GIS-Kompetenz am FMPC lagen die Trainingsschwerpunkte im Gelände in den Bereichen der Feldnavigation und der Stichprobenerhebung zur Standardisierung und Qualitätssicherung der Forsteinrichtungsarbeiten.

3. Das Projektgebiet

Das Projektgebiet Mongonmorit befindet sich ca. 180 km nordöstlich der Hauptstadt Ulaanbaatar in der östlichen Randzone des 1227 ha umfassenden Schutzgebietes Khan Khentii (SPA). Das Schutzgebiet erstreckt sich über drei Aimags (Tov, Khentii und Selenge). Nach dem mongolischen Waldgesetz werden die Wälder in drei Kategorien eingeteilt: "Streng geschützte Wälder" (8,4 Mio. ha), "geschützte Wälder" (7,9 Mio ha) und "Wirtschaftswälder" (1,2 Mio ha). Um der anhaltenden Degradierung der natürlichen Ressourcen entgegenzuwirken, wurden seit 1990 insgesamt 17 Mio. ha, ca. 10,9% der Landesfläche, unter Schutz gestellt. Waldgebiete nehmen davon ca. 8,4 Mio. ha ein (Batsukh, 2004). Die streng geschütz-

ten Gebiete, zu denen auch das Schutzgebiet „Khan Khentii“ gehört, werden wiederum in Kern-, Schutz-, und Nutzungszonen mit Auflagen unterteilt (GTZ, EPA, 2000). Die Errichtung von Pufferzonen um diese SPAs hat das Ziel, eine nachhaltige sozioökonomische Entwicklung der Gebiete unter Partizipation der lokalen Bevölkerung zu fördern und die natürlichen Ressourcen zu sichern. Das Inventurgebiet umfasst eine Fläche von 3416 km² und wird durch 10 Satellitenbildkarten im Maßstab 1: 50 000 abgedeckt. Nähere Untersuchungen erfolgten in der Pufferzone des eigentlichen Schutzgebietes mit einer Fläche von 1124 km² (Abb.1). Davon entfielen 548 km² auf den Wald.

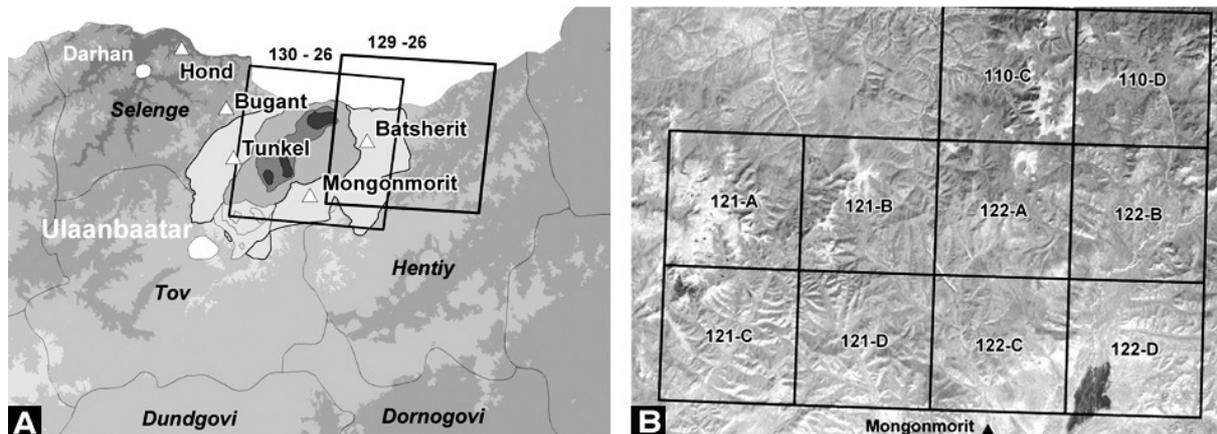


Abb.1A: Lage des Projektgebietes in der östlichen und westlichen Randzone des SPA Khan Khentii. Die "use zone" wird in der Übersichtskarte in hellgrau dargestellt.

Abb.1B: Index für die Satellitenbildkarten 1: 50 000 im N von Mongonmorit.

Die Höhenlage im Projektgebiet erstreckt sich von 1280 m bis 2680 m. Das Waldgebiet ist der südliche Ausläufer der zirkumpolaren Taiga, die auf dem eurasischen Kontinent 12,4 Mio. km² bedeckt (Treter, 1996). Davon entfallen nur 1 % auf die Mongolei, wo es sich um eine sog. Gebirgstaiga (oroborealer Wald) handelt. Neben dem geringen Niederschlag (ca. 400 mm/Jahr) ist die Exposition ein wesentlicher Standortfaktor im Khan Khentii. In den unteren Lagen ist kein Wald auf den Südhängen anzutreffen. Grund hierfür ist die höhere Sonneneinstrahlung, die insbesondere im Frühjahr zum Absterben durch Frosttrockenheit bei den Bäumen führt (Treter 1996). Die Hauptbaumarten im Projektgebiet sind die Lärche (*Larix sibirica*), die Zirbelkiefer (*Pinus sibirica*). Die Birke (*Betula platyphylla*) und die Aspe (*Populus tremula*) spielen eine nebensächliche Rolle. In der subalpinen Höhenstufe dominiert die Lärche, zu der sich gelegentlich Zirbelkiefer als Unterstand gesellt. Sie ist erst in den alpinen und hochalpinen Lagen bestandbildend (ab ca. 1600 m über Meeresspiegel). Im Durchschnitt weisen die kartierten Zirbelbestände eine Höhenlage von ca. 1900 m auf. Allerdings kommt diese Baumart im beschriebenen Inventurgebiet im Vergleich zur Lärche nur selten vor. Die natürliche Sukzession zu Waldbeständen, die aus den Klimaxbaumarten Lärche oder Zirbelkiefer (je nach Höhenlage) bestehen, wird durch großflächige Feuer unterschiedlicher Intensität oder Insektenbefall unterbrochen und wieder in eine Initialphase zurückgesetzt. Diese wird insbesondere durch die Pionierbaumart Birke gekennzeichnet. In dem Schutz dieser Baumart entwickeln sich die Lärche oder Zirbelkiefer, welche die Birke nach ca. 80 Jahren überwachsen. Lärchenbestände jüngeren Alters sind im Projektgebiet rar. Des Weiteren sind überalterte Bestände mit hohem Totholzanteil und somit hoher Forstschutzproblematik (Feuergefahr) stark vertreten. Der durchschnittliche Totholzanteil aller Waldstraten betrug 32 m³ (Zakrzewski 2004). Eine schlechte Holzqualität muss für diese Wälder angenommen wer-

den. Sie resultiert aus häufigen Verletzungen und Schwächungen der Bäume durch die Waldbrände.

4. Datenaufbereitung

Im Vorfeld des Geländeaufenthaltes wurden am Institut für Geoforschung (geo3) der Technischen Fachhochschule (TFH) Berlin multitemporale Satellitenbildkarten im Maßstab 1 : 50 000 (SBK 50) erstellt. Das Projektgebiet wird von zwei Landsat 7 ETM + Szenen abgedeckt (Abb.1A). Die Satellitenbildszenen 130/26 (Path/Row) und 129/26 lagen jeweils als Sommer- und Winterszene aus den Jahren 2002 (Sommer) und 2000 (Winter) vor. Für die SBKs wurden die MSS- und PAN-Daten zu einer höher auflösenden Farbbildbasis kombiniert ("resolution merge") und in der spektralen Bandkombination 5 4 3 (RGB) dargestellt. Die Satellitenbildkarten enthielten neben topographischen Informationen (z.B. Waldwegnetz), die aus den zur Verfügung stehenden georeferenzierten topographischen Karten im Maßstab 1 : 100 000 und auf der Basis der Satellitenbilddaten digitalisiert wurden, auch UTM- Gitternetzlinien (Zone 49 N), um die Orientierung und Navigation im Gelände zu erleichtern. Aus den Isolinien mit einer Äquidistanz von 20 m wurde für das Projektgebiet ein Digitales Höhenmodell (DHM) abgeleitet.

Die Forsteinrichtungskarten (FEK) der Mongolei existieren in der Regel als handkolorierte Unikate auf Basis von semikontrollierten Luftbildmosaiken aus den Jahren 1966 bis 1982 und wurden im Rahmen einer sowjetisch-mongolischen Kooperation im Forstsektor erstellt. Die geometrische Basis enthält also noch Radialverschiebung und Maßstabdifferenzen und kann nicht in eine Kartenprojektion überführt werden. Die Forsteinrichtungskarten beinhalten neben Hauptabteilungsgrenzen, die sich an natürlichen topographischen Grenzen oder an dem bestehenden Wege- oder Gewässernetz orientieren, auch Informationen zur dominierenden Baumart und der jeweiligen Altersstufe in Form von Unterabteilungen. Eine Aktualisierung der thematischen Inhalte soll nach dem Forstgesetz von 1995 alle 10 Jahre durch terrestrische Geländebegehungen und Stichprobenanalysen des FMPC vorgenommen werden. Tatsächlich weisen die Forsteinrichtungskarten, abhängig vom Bearbeiter und vom Bearbeitungsstand, unterschiedliche Qualität auf. Die Ergebnisse der Luftbildinterpretation wurden nicht immer im Gelände verifiziert (Parewicz et al., 1972). Die letzte Überarbeitung der FEK des Projektgebietes Mongonmorit lag aus dem Jahr 1990 vor. Deshalb wurde eine visuelle Neuinterpretation der FEK auf der Basis der SBK 50 erforderlich. Die Interpretation und Aktualisierung der Flächeninformationen (z.B. Brand/Insektenbefall, Holzschlag) erfolgte am FMPC und wurde anschließend am International Computer Center (ICC) in Ulaanbaatar digitalisiert und in die weitere GIS-Kartenerstellung einbezogen.

Bei der visuellen Interpretation konnte auf Erfahrungen der Mitarbeiter des FMPC aus den Jahren 2001 und 2002 zurückgegriffen werden (Meissner & Wyss, 2002). Der temporale Klassifizierungsansatz (Einbeziehung von Sommer- und Winterbild) ermöglicht eine sehr gute Trennung von Laub- und Nadelwaldbeständen sowie eine zusätzliche Differenzierung innerhalb des Nadelwaldes. Durch Einbeziehung des Winterbildes können die im Winter nadellosen Lärchen visuell von Kiefernbeständen abgegrenzt werden. Eine Ausnahme bilden hier stark geneigte Nordhänge, auf denen eine Differenzierung der Nadelbaumarten aufgrund der Schattenbildung in der Winterszene nicht möglich ist. Durch die im September aufgenommene Satellitenbildszenen (Sommer) ist eine zusätzliche spektrale Abgrenzung von Laubbaumbeständen (Birke, Pappel) aufgrund der einsetzenden Verfärbung im Spätsommer möglich.

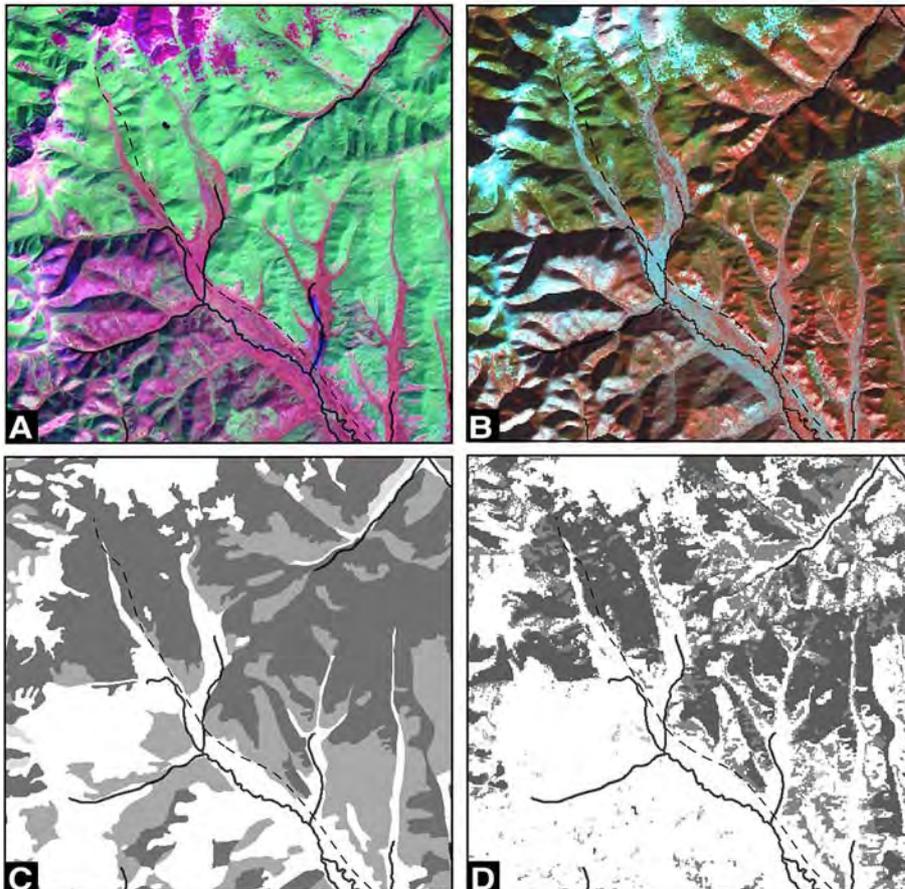


Abb. 2A und 2B: Ausschnitt aus der Satellitenbildkarte 1 : 50 000, Blatt M-49-121 in der Kanalkombination 543 (RGB). A: Sommer, B: Winter. Abb. 2C: Visuelle Satellitenbildinterpretation. Abb. 2D: Digitale Klassifikation.

In der Farbausgabe der Abbildung 2A (beigefügte CD-ROM) sind im SW des Satellitenbildausschnittes Waldschäden (Brand/Insektenbefall) zu erkennen. Im Winterbild (Abb. 2B) können Kiefernbestände anhand der grünen Reflexion in der gewählten Bandkombination identifiziert werden. Die digitale Forsteinrichtungskarte (Abb. 2C) zeigt eine generalisierte SW-Darstellung der dominierenden Baumarten. In der Farbabfolge dunkelgrau bis hellgrau werden die dominierenden Baumarten Zirbelkiefer, Lärche und Birke dargestellt. Die digitale Klassifizierung (Abb. 2D) zeigt im Vergleich eine räumlich differenziertere, pixelbezogene Klassifizierung der Baumarten und basiert auf einer überwachten Klassifikation unter Berücksichtigung der Flächeninformationen aus der digitalen Forsteinrichtungskarte und der Geländeaufnahme ("ground truthing").

5. Training

Im Rahmen einer mehrtägigen GIS-Schulung am FMPC erfolgte die Planung der terrestrischen Waldinventur in Zusammenarbeit mit FOREM International. Die Stichprobenverteilung wurde auf der Basis der digitalen Forsteinrichtungskarte nach der dominierenden Baumart und Altersstufe stratifiziert, so dass sich insgesamt 26 homogene Straten ergaben. Ein Trainingsschwerpunkt bildete die Einführung in die Navigation und mobile Datenerfassung mit Hilfe von ArcPAD (Abb. 3), um die Lokalisierung der Stichprobenpunkte im Gelände auf der Basis der Satellitenbilddaten im MrSID-Format zu erleichtern und Flächeninformationen aus den digitalen Forsteinrichtungskarten vor Ort zu verifizieren. An den Inventurarbeiten

waren bis zu 25 Personen, darunter Studenten des NUM, der Mongolian Politechnical University und Mitarbeiter privater Forsteinrichter sowie des FMPC beteiligt. Insgesamt wurden über 2000 Stichproben genommen, davon 947 in der Nutzungszone. Die Stichprobenzahl pro Stratum wurde proportional zu seinem Anteil an der vorher ermittelten Gesamtfläche festgelegt. Die mangelnde Erschließung der Wälder im Inventurgebiet machte eine rasterartige Verteilung der STP im Gelände nicht sinnvoll. 20 bis 30 Stichprobenpunkte wurden täglich pro Inventurgruppe auf der Basis der SBKs ausgewählt, die nach einem Zufallsprinzip meistens hufeisenförmig angeordnet waren. Der Abstand zwischen den Stichproben betrug $100 * 100$ m. Der erste Punkt war mit einem GPS-Gerät (Garmin 12) bzw. mit Hilfe von ArcPAD einzumessen. Weitere Stichproben konnten dann anhand einer Bussole, eines Gefällmessers und einer 50 m langen Wäscheleine lokalisiert werden. Neben stichprobenbezogenen Angaben (z.B. Nummer, UTM-Koordinaten, Abteilungs- und Unterabteilungsnummer) wurden auch baumbezogene Daten, wie z.B. Baumnummer, Baumart, Durchmesser, Höhe, geschätztes Alter, erkennbare Schäden am Stamm und Totholzanteile in Formulare aufgenommen. Die Vorgehensweise während der Geländeaufnahmen ist als Sechsbaumstichprobe (SEBAST) bekannt (Zöhler, 1980). SEBAST gehört zu den Abstandsverfahren und wird weltweit als anerkanntes Inventurverfahren eingesetzt. Mit Hilfe der SEBAST können drei wichtige forstliche Parameter abgeleitet werden: Grundfläche pro Hektar (die Summe der Querschnitte aller Bäume pro Hektar), der Vorrat (das Holzvolumen) und die Baumzahl pro Hektar.



Abb. 3: GIS Schulung am FMPC, Training vor der Jurte und Lokalisierung von Stichprobenpunkten

6. Auswertung

Durch statistische Auswertung der in MS ACCESS eingegebenen baumbezogenen Daten konnte unter anderem das Holzvolumen pro Stratum (Mittelwert) berechnet werden. Dabei hat sich gezeigt, dass die Stratifizierung nach Altersstufe nur schwer nachvollziehbare Ergebnisse liefert, da die visuelle Abschätzung des Baumalters im Gelände ohne weitergehende dendrochronologische Untersuchungen nur bedingt möglich ist. Der Holzvorrat ist unter den hochkontinentalen klimatischen Bedingungen wesentlich von Bodeneigenschaften und von expositionsbedingten klimatischen Unterschieden abhängig. Die in Abbildung 4 dargestellte Volumenberechnung für die dominierenden Baumarten Lärche, Zirbelkiefer und Birke zeigt, dass in der niedrig gelegenen Nutzungszone kaum Bestände durch eine einzige Baumart ge-

bildet werden. Obwohl das Lärchenholz über alle Straten hinweg den meisten Anteil an dem Gesamtvorrat einnimmt, ist das Holzvolumen der dominierenden Baumart im entsprechenden Stratum, das nach ihr benannt wird, jeweils am höchsten. Eine Ausnahme bilden dabei die beiden jüngeren Birkenflächen (Altersstufe 4 und 5). Der Grund hierfür kann in dem geringen Stichprobenumfang liegen (n = 17 bzw. n = 29). Auch der höchste Vorrat des Birkenholzes pro ha in den Birkenflächen mit der Altersstufe 6 liegt angesichts des recht hohen Vorrates an Lärche in derselben Fläche zu hoch. Hier kann ebenfalls ein zu geringer Stichprobenumfang (n = 18) die mögliche Erklärung liefern. Die Birkenflächen machten insgesamt 1,8% der Gesamtfläche aus. Tendenziell ist eine Zunahme des Holzvorrates bei älteren Beständen zu beobachten. Die Alterstufe stellt das geschätzte Alter jeden Baumes dar. Für die Nadelbäume betrug eine Alterstufe 20, für die Laubbäume 10 Jahre. Eine Lärche mit der Altersstufe 4 wäre demzufolge auf ein Alter zwischen 61 bis 80 Jahren geschätzt. Eine Birke mit derselben Bezeichnung wäre zwischen 31 und 40 Jahre alt.

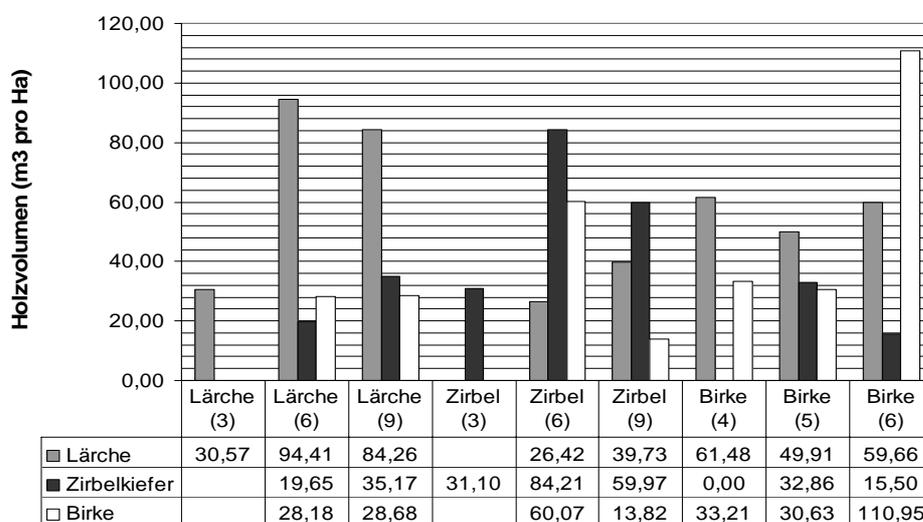


Abb. 4: Berechnung des Holzvolumens für die dominierende Baumart nach Altersstufen (Auswahl).

Neben der Berechnung von Flächenstatistiken können flächenbezogene Hochrechnungen des Holzvolumens pro Baumart erfolgen (Abb. 5). Für das Projektgebiet Mongonmorit ist eine auf die Schutzzonen bezogene Auswertung sinnvoll, da die Nutzungsintensität vom Schutzstatus und vom Grad der Walderschließung abhängt und damit wesentlich die Baumartenzusammensetzung und Baumschädigung beeinflusst.

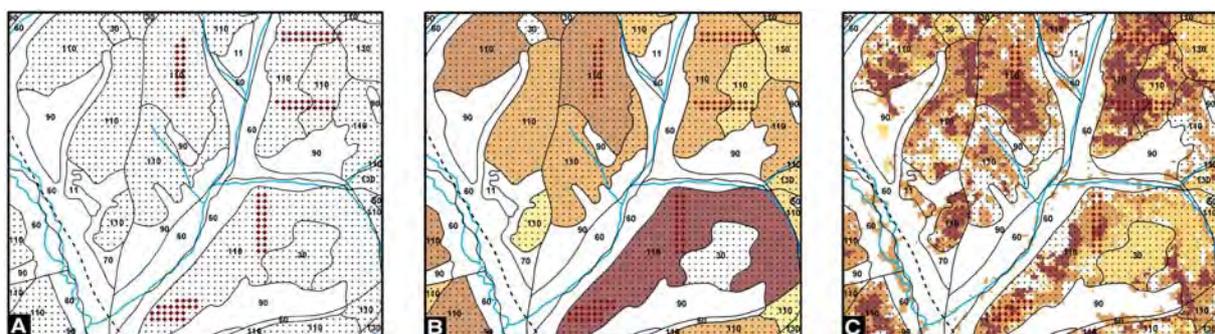


Abb. 5: Objektbezogene Waldinventur auf Stichprobenbasis und flächenbezogene Hochrechnung des Holzvorrates am Beispiel der Lärche. 5A: Auswahl der STP's aus dem 100 * 100 m Raster, 5B: Hochrechnung auf Basis der FEK, 5C: Hochrechnung auf Basis der digitalen Klassifizierung.

Die Synthetisierung der Auswertungsergebnisse bildet die Grundlage zur Erstellung von aktualisierten Planungsgrundlagen zur Unterstützung der Forsteinrichtungsarbeiten und der Waldmanagement-Planung.

6. Fazit und Ausblick

Für das weiter östlich gelegene Projektgebiet Basherit sollen die angewendeten Erfassungsmethoden im Sommer 2004 in Teilbereichen modifiziert werden. Das GIS-Training für die Mitarbeiter des FMPC und die darauf folgenden Geländeaktivitäten werden dabei kontinuierlich weitergeführt. Auf eine visuelle Interpretation der SBKs wird aus Zeit- und Kostengründen verzichtet. Die Stratifizierung (Ausweisung von Unterabteilungen) und die terrestrische Inventur werden auf der Basis einer wissensbasierten multitemporalen Klassifizierung erfolgen. Durch die Verwendung geeigneter Testgebiete (einschl. visueller Interpretation) und die zusätzliche Berücksichtigung von topographischen Parametern wie Exposition und Höhengschichtung kann die Klassifizierung optimiert werden. Problematisch sind nach wie vor extreme Schattenbereiche, die vor allem im Winterbild aufgrund des niedrigen Sonnenstandes zu einer Beeinträchtigung der Klassifizierungsergebnisse führen. Hier sollten zukünftig Methoden zur topographischen Normalisierung (Beleuchtungskorrektur) auf der Basis eines digitalen Höhenmodells (DHM) Anwendung finden. Neben der Erprobung einer formularbasierten Erfassung der forstwirtschaftlichen Parameter im Gelände mit Hilfe von ArcPAD werden für Detailkartierungen auch radiometrisch höchstauflösende Satellitenbilder (Quickbird) zur Verifizierung und Ergänzung der digitalen Klassifizierung eingesetzt.

7. Literatur

- BATSUKH, N. (2004): Forest ecosystems in Mongolia
FAO /UNDP (2001): Report on "Towards a National Forest Programme for Mongolia"
GTZ & EPA (2000): Government Coordination Agency and the Environmental Agency, 2000. Protected Areas of Mongolia (Booklet). Edited by D. Myagmarsuren
MEISSNER, B. & WYSS, D. (2002): Waldmanagement in der Mongolei – Fernerkundung und GIS unterstützen "Naturschutz und Randzonenentwicklung". In: Publikation der DGPF
PAREWICZ, R., RUDZKI, K., SZANIAWSKI, A., WALTHER, S. (1972): Report to the government of Mongolia on forestry, forest industries and wildlife survey. FAO, Rome, Final Report
TEUSAN, S. (2000): Forest Inventory and Forest Planning in Mongolia, Analysis of current practices and recommendations for future forest planning. Unveröff. Bericht zum GTZ-Projekt "Naturschutz und Randzonenentwicklung"
TRETER, U. (1996): Gebirgs-Waldsteppe in der Mongolei. In: Geographische Rundschau, Band 48, Heft Nr. 11, S. 655-661
ZAKRZEWSKI, M. (2004): Forstinventur in Mongonmorit, Abschlussbericht zum Consultingvertrag, PN: 00.2225.1-001.00; GTZ Eschborn, 18 S.
ZÖHRER, F. (1980): Forstinventur: Ein Leitfaden für Studium und Praxis. Hamburg, Berlin: Paray, 207 S.

FE-basiertes Wurzelschwamm-Monitoring in der Wiederaufforstung der Lausitzer Tagebau- Folgelandschaft

B. MEISSNER, M. RICHTER, S. DOLP¹

Zusammenfassung: Neben Insektenfraß ist vor allem der Pilzbefall des Wurzelwerkes eine wichtige Form der biogenen Schädigung von Wäldern. Insbesondere der Wurzelschwamm verbreitet sich in Monokulturen von Kiefern auf nährstoffarmen Böden mit relativ geringen Niederschlägen.

Hier werden FE-gestützte Methoden zur Erfassung der Wurzelschwammschäden in Wiederaufforstungsgebieten der Tagebaufolgelandschaft in der Lausitz dargelegt und erste Ergebnisse vorgestellt und die weitere Entwicklung zu einem GIS-gestützten Wurzelschwamm-Monitoring vorgezeichnet.

Mit Hilfe von Luft- und Satellitenbildern lassen sich diese Muster großflächig kartieren und ermöglichen eine Früherkennung auch in Waldgebieten, die nicht ständig terrestrisch kontrolliert werden. Durch multitemporale Auswertungen von hochauflösenden Satellitenbilddaten in Abstimmung mit punktuellen Geländeuntersuchungen lässt sich die Ausbreitung des Wurzelschwamms dokumentieren und quantifizieren. In einem Pilotgebiet werden die aus FE-Daten gewonnenen Informationen mit den im Gelände erfassten Daten im Rahmen eines GIS verknüpft und sollen für weitere Planungen von forstwirtschaftlichen Maßnahmen in den betroffenen Revierförstereien genutzt werden.

1. Problemstellung

In den Wiederaufforstungsgebieten der Tagebaufolgelandschaft in der Lausitz treten verstärkt biotische Schäden auf. Hierbei handelt es sich nicht wie oft um Insektenfraß, sondern um Pilzbefall des Wurzelwerkes. Insbesondere der Wurzelschwamm verbreitet sich bevorzugt in Monokulturen von Kiefern (*Pinus silvestris*) auf nährstoffarmen Böden mit relativ geringen Niederschlägen.

Dieses auch von sibirischen Wäldern in der Übergangszone zur Steppe bekannte Phänomen (SCHATJAJEW, 1987, 2001) tritt verstärkt auf den Kippenböden der ehemaligen Braunkohletagebaue auf. Die erkrankten Bäume sterben in ein bis zwei Jahren ab und ergeben ein sich stetig ausbreitendes "Lochmuster" in den Waldbeständen. Hierbei entstehen nicht nur Verluste an wirtschaftlich nutzbarem Holz, sondern auch Totholz, das ideale Brutstätte für Insekten ist, die zur weiteren biogenen Schädigung der Wälder führen.

Schnelles Handeln ist also angesagt, um Gegenmaßnahmen einleiten zu können. Darüber hinaus müssen bisher befallene Gebiete überwacht und ein Neubefall möglichst schnell erkannt werden. Hierbei könnte ein FE-gestütztes Monitoring Revierförstereien unterstützen, die knappen Personalressourcen effektiver einzusetzen.

2. Randbedingungen

Die Braunkohleförderung in der Lausitz findet auf großen Abbaufeldern statt. Dieser großflächige Abbau stellt einen schweren Eingriff in den Naturhaushalt der betroffenen Landschaften

¹ Prof. Dr. BERND MEISSNER, MARCUS RICHTER,, SEBASTIAN DOLP, geo3 (Institut für Geoforschung der TFH Berlin), Luxemburger Str. 10, D- 13353 Berlin, e-mail: meissner@tfh-berlin.de, richter@tfh-berlin.de

dar (GROSSER, 1985). Die Fördermenge im Lausitzer Revier ist seit der Wende stark rückläufig. So betrug die Förderung 1989 noch 195 Mio. Tonnen und bereits im Jahre 1999 lediglich 51 Mio. Tonnen (LAUBAG, 2000).



Abb. 1/2: Vom Wurzelschwamm befallene Kiefer und Bestandslücke mit vitalem Baum im Zentrum

Nach der Auskohlung der Tagebauflächen werden diese rekultiviert. Entscheidend für den Kulturwert der Kippen sind die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Kippgesteins (WÜNSCHE et al., 1970). In der Lausitz besteht das Deckgebirge aus tertiären und quartären Lockersedimenten, die größtenteils sehr nährstoffarm sind. Dazu kommt die Vermischung der ehemals geschichteten Ablagerungen durch den Einsatz der Förderbrückentechnologie bei der Verkippung des Abraumes. Dadurch gelangen kulturfeindliche Substrate bzw. Substratgemische an die Kippenoberfläche. Zentrale Bedeutung der Wiederaufforstung hat deshalb die "genügsame" gemeine Kiefer, da dies am ehesten mit den schlechten Wuchsbedingungen infolge wachsender Heterogenität der Kippsubstrate (EMMERICH, 2000) zurechtkommt.

In vielen dieser Stangenholzbestände wurden die üblichen Durchforstungen bzw. ein Bestandsaufschluss durchgeführt. Dabei wurde an bereits durchforsteten Kiefernstangengehölzen Schäden festgestellt, die ca. drei bis sechs Jahre nach der Durchforstung auftraten. Die Schäden sind unabhängig von Altersklassen und führen zu einem horst- und gruppenweisen Absterben der Kiefern. Als Ursache dieser umfangreichen Sterbelücken auf Kippböden wurde der Wurzelschwamm (*Heterobasidion anosum*) eindeutig nachgewiesen (HEINERSDORF & HEYDECK, 1998).

In der Regel stellen Durchforstungsstümpfe, auf denen sich die Sporen des Wurzelschwammes niederlassen, die Infektionsquelle dar. Die Verbreitung des Wurzelschwammes findet dann im Boden mit Hilfe von Wurzelkontakten zu benachbarten Bäumen statt. Hierbei versuchen sich die Bäume vor dieser Übertragung durch verstärktes Harzen der Wurzeln zu schützen, wobei allerdings die Aufnahmefähigkeit an Wasser und Nährstoffen rapide absinkt und in der Regel mit dem Absterben des Baumes, wie in Abb. 1 sichtbar, endet (HEYDECK, 2000). Wenige Exemplare überleben nach Heydeck (mündl. Mittel., 2003) allerdings diese Attacke, meist im Zentrum der Bestandslücke (in der Nähe des Infektionsbeginns), so dass sich dort

wegen der fehlenden Konkurrenz ein überdurchschnittlich gut wachsender Einzelbaum befindet, was Abb. 2 ebenfalls verdeutlicht.

Die geplanten Durchforstungen der Stangenhölzer stellen folglich in der bisherigen Form ein erhebliches Gefahrenpotenzial dar, somit gilt es bereits entstandene Schäden möglichst rasch zu erkennen, um präventive Maßnahmen für zukünftige forstwirtschaftliche Planungen einzusetzen.

3. Das Konzept

Fernerkundungsdaten werden schon seit langem bei der Vegetationskartierung eingesetzt (FIETZ, 1992). Dies führte zur großflächigen Biotoptypen-Kartierung von Brandenburg mit Hilfe der 1992 beflogenen CIR-Luftbilder. Auch Waldschaden-Kartierungen konnten mit Hilfe digitaler Luft- und Satellitenbilddaten durchgeführt werden (HOFFMANN, 1992). In der Mongolei kommen Forstkartierung z. B. mit Landsat ETM+ Daten erfolgreich zum Einsatz (MEISSNER & WYSS, 2000). Die Erfassung von relativ kleinen Bestandslücken in Aufforstungen war allerdings bisher die Domäne von Luftbilddaten, da dort bei Befliegungen im Maßstab von 1 : 10 000 eine Bodenauflösung von ca. 0,3 m erreicht werden. Großbefliegungen werden aber in längeren Zeitintervallen durchgeführt, spezielle Befliegungen kleiner Gebiete sind dagegen teuer. Hier eröffnet die Nutzung von den seit kurzem verfügbaren Aufnahmen von hochauflösenden Satellitenbilddaten, wie die von Quickbird mit einer Bodenauflösung von ca. 0,6 m (panchromatisch), 2,4 m (multispektral), neue Möglichkeiten, relativ kleine Gebiete in jährlichen Intervallen zu beobachten. Für diese Pilotstudie wurde das folgende Konzept entwickelt.

Als Ausgangsdaten für die Erfassung der Veränderung werden CIR-Luftbilder der landesweiten Befliegungen von Brandenburg (hier vom 26.06.1992) im Maßstab 1 : 10 000 genutzt. Als aktueller Datensatz ist ein Quickbird-Datensatz vom Juni 2004 vorgesehen. Um die Vergleichbarkeit herzustellen, werden beide Datensätze georeferenziert und für die visuelle Interpretation als CIR-/Falschfarbenbild mit einer geometrischen Auflösung von 0,6 m aufbereitet. Hierbei müssen die CIR-Luftbilder über Kontrollpunktmessungen im Gelände und Aerotriangulation mit einem Passpunktnetz zur geometrischen Korrektur der Einzelbilder und u. U. mit einem Höhenmodell in Orthofotos überführt werden. Dieses CIR-Luftbild kann mit den Quickbird-Daten verglichen werden, die über die gleichen Gelände-Passpunkte korrigiert werden. Für den Quickbird-Datensatz wird unter Verwendung der Pan-Daten und den MS-Daten des Kanal 2 (Grün), 3 (Rot) und 4 (NIR) eine farbige Bildbasis (Merge) erzeugt, die unmittelbar mit der der CIR-Luftbilder vergleichbar ist, da beide die gleiche Georeferenzierung sowie geometrische und radiometrische Auflösung haben.

Eine visuelle Bildinterpretation erfolgt am Bildschirm und wird dort auch gleich durch Linienelemente festgehalten, so dass die Kartierung umgehend in eine oder mehrere GIS-Ebenen der GIS-Datenbank abgelegt werden kann, wo bereits die Bild-Ebenen gespeichert sind. Hieraus kann einerseits der aktuelle Stand (2004) visualisiert und andererseits die Entwicklung seit 1992 dokumentiert werden. Für eine spätere großräumige Erfassung wird auch der zusätzliche Einsatz von digitaler Klassifizierung angestrebt.

Wenn in die GIS-Datenbank über die Bilddaten und deren Interpretationsergebnisse hinaus auch bodenkundliche und forstwirtschaftliche Daten, insbesondere Feldbefunde integriert werden, lassen sich auch Abhängigkeiten analysieren, die nicht "offensichtlich" sind. Von besonderem Wert erscheint auch die Eingabe räumlich zuzuordnender Präventivmaßnahmen, da es sich bei einer zukünftigen jährlichen Beobachtung auch der quantitative Erfolg ermitteln lässt.

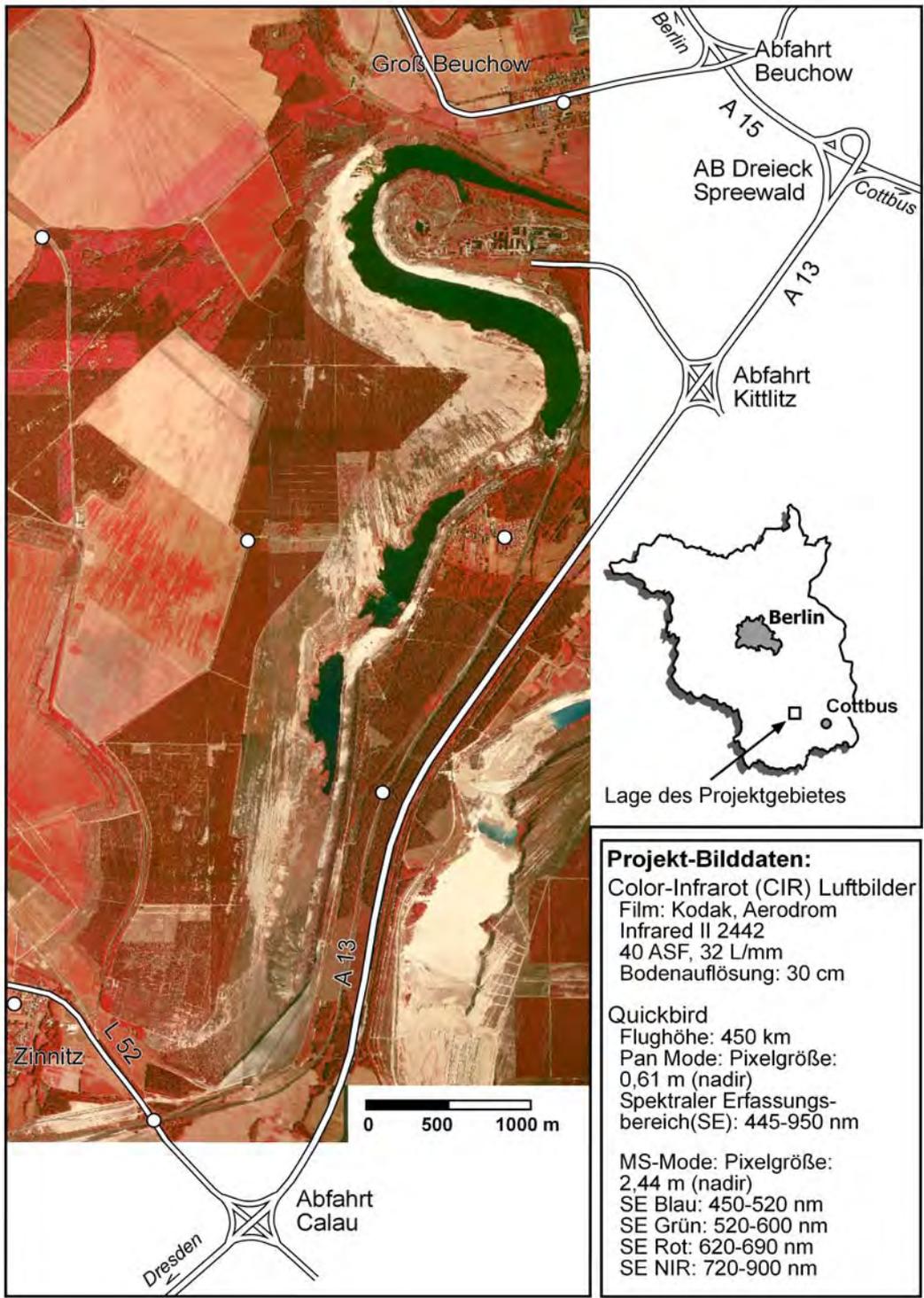


Abb. 3: Projektgebiet der Pilotstudie zwischen Zinnitz und Groß Beuchow. Auf der Basis des CIR-LB-Mosaiks (26.06.1992) wird auch die Lage der Geländekontrollunkte (18.05.2004) dargestellt. Technische Daten der Projekt-Bilddaten nach ALBERTZ (2001) und www.digitalglobe.com

Das Projektgebiet und Stand der bisherigen Auswertung

Als Untersuchungsgebiet der Pilotstudie wurde ein Tagebaugebiet der ehemaligen LAUBAG, jetzt Vattenfall Europe zwischen Zinnitz und Groß-Beuchow westlich der A 13 südlich des Autobahndreiecks Spreewald gewählt (Abb. 3). Hier lag der Schwerpunkt der von EMMERICH (2000) im Rahmen einer Diplomarbeit an der FH Eberswalde durchgeführten Untersuchungen zum Wurzelschwamm-Befall der seit ca. 20 Jahren mit Kiefern wiederaufgeforsteten Kippen. Das noch immer durch Senkungserscheinungen nicht zur Ruhe gekommene Gebiet westlich der sich als Seen-Kette bildenden Resttagebaulöcher soll später als Naturschutz und Naherholungsgebiet genutzt werden. Neben Maßnahmen der Bodenverfestigung und durch Rückbildung der tagebaubedingten Grundwasserabsenkung ist das Gebiet noch ständigen Veränderungen unterlegen. So sind beim Vergleich von Landsat ETM+ Daten von 2001 und auch den aktuellen topographischen Karten (TK 1 : 10 000, Aufnahmezustand 2003) bereits deutliche Veränderungen in dem Verkehrsnetz und der Seenspiegelstände im November 2003 und Mai 2004 bei der Feldarbeit zu beobachten.



Abb. 4: Passpunktmessung mit Hilfe einer Trimble GPS-Ausrüstung

Das georeferenzierte Luftbildmosaik (1992) wurde erstellt. Dazu wurde im Frühjahr 2004 mit Hilfe faststatischer Messungen durch eine Trimble GPS-Ausrüstung (bestehend aus Empfänger 5700, Zephyr-Antenne und TSCe-Controller für eine Postprocessing-Auswertung unter Einbeziehung von SAPOS-Korrekturdaten der SAPOS-Station Lübben) und Unterstützung der geo3-Arbeitsgruppe von W. KORTH Passpunkte eingemessen (Abb. 4), deren Lage so gewählt wurde, dass sie auch zur Korrektur der Quickbird-Daten herangezogen werden können. Über Aerotriangulation wurde das Passpunktenetz zusammen mit der geo3-Arbeitsgruppe M. KÄHLER für die Luftbilder verdichtet, so dass jedes der Bilder einzeln entzerrt und später mit den anderen zu einem kontrollierten Mosaik zusammengefügt wurde. Die mittleren Lagefehler liegen bei weniger als 0,5 m, was bei einem Bildelement von 0,6 m Seitenlänge adäquat ist.

Die Kartierung von Bestandslücken ist durch visuelle Interpretation problemlos. Jedoch werden auch Wege für die digitale Klassifikation erprobt (Abb. 5). Eigene Vegetationsuntersuchungen mit IKONOS-Daten (1 m Pan / 4 m MSS) in Spanien lassen den Schluss zu, dass sich Lichtungen über 4 m Durchmesser auch durch digitale Klassifizierung gut erfassen lassen, wenn sie wie in Abb. 2 mit Gras überwuchert sind. Der eigentliche Beleg steht aber noch aus, da sich der Bestellvorgang für die Quickbird-Daten als langwieriger erweist als angenommen. Das gewünschte Aufnahmezeitfenster war wegen der Vergleichbarkeit mit den CIR-Luftbild-Aufnahmen Juni 2004, nicht möglich und wegen der Wetterlage bis auf August ver-

längert. Dies ist bei weiterer Planung für aktuelle Vegetationsauswertungen unbedingt zu berücksichtigen.

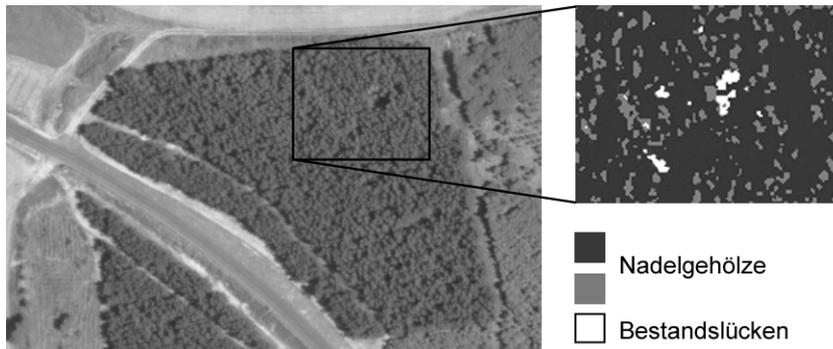


Abb. 5: Color-Infrarot-Luftbild und Klassifizierung (Ausschnitt)

Beobachtungen der Feldarbeit für Waldkartierungen in der Mongolei im Mai 2004, bei der auch Quickbird-Daten verglichen wurden, zeigen, dass die geometrische Auflösung sicher für die visuelle Interpretation von Bestandslücken geeignet ist. Problematisch erweist sich aber ein flacher Sonnenstand bei der Aufnahme (Februar 2002) bei der Beschattung von Lichtungen. Somit scheint ein Aufnahmedatum um den Sonnenhöchststand (22. Juni) für geographische Breite über 50° optimal

4. GIS-Anbindung und Ausblick

Die hier vorgetragenen Ergebnisse können nur ein Zwischenbericht über den Stand eines noch laufenden Projektes sein. Wie so oft verzögern sich Untersuchungen zu Beginn von Studien, da Finanzmittel später als geplant zur Verfügung stehen, der Wunsch nach einem von der Natur begünstigten Befliegungstermin nicht unmittelbar technisch umsetzbar ist und der Redaktionsschluss für das pünktliche Erscheinen einer Veröffentlichung auch nicht endlos dehnbar ist. Wir sind aber sehr zuversichtlich, dass der im September vorgesehene Vortrag schon einen deutlich fortgeschrittenen Stand der Untersuchungen darstellen kann.

Darüber hinaus wird zukünftig die Einbindung von Feldbeobachtungen und von Laborergebnissen der Beprobung von Boden- und Pflanzen Schwerpunkt der Weiterentwicklung der Methodik zur Wurzelschwammebeobachtung sein. Hierbei sollten auch möglichst alle Gegenmaßnahmen raumrelevant erfasst werden, so z. B. das Ausbringen von Kalk, die Versuche von Unterbrechung der Wurzelkontakte durch Pflanzung von Laubgehölzen und Gebiete, in denen die Stumpen durch Aufbringen einer Schutzlösung gegen Sporenflug immun gemacht wurden. Hierzu ist eine enge Zusammenarbeit mit den zuständigen Revierförstereien und dem Landesforstamt Eberswalde notwendig, damit diese Daten in die GIS-Datenbank eingegeben und Bewertungskriterien der GIS-Analysen erarbeitet werden können.

Da dies vom Leiter der Forstwirtschaften der Abteilung Rekultivierung der Vattenfall Europe (K. PREUBER) und dem Dezernat Pilzliche Schaderreger der Landesforstanstalt Eberswalde (P. HEYDECK) zugesagt wurde, sollten wir die Pilotstudie im Frühjahr 2005 erfolgreich abschließen können.

5. Literatur

ALBERTZ, J., 2001: Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern, 2. Aufl., Darmstadt.

- EMMERICH, G., 2000: Untersuchungen zu Absterbeerscheinungen in Kiefernstangengehölzen (*Pinus sylvestris L.*) auf verschiedenen Kippsubstraten der Niederlausitz. Diplomarbeit an der FH Eberswalde (unveröffentlicht).
- GROSSER, K.H., 1985: Die Auswirkungen des Braunkohletagebaus auf die Naturschutzobjekte im Bezirk Cottbus. Naturschutzarbeit in Berlin und Brandenburg 21/3: S. 65-78.
- HEINSDORF, D.; HEYDECK, P., 1998: Schäden in Kiefernstangengehölzen durch den Pilz *Heterobasidion annosum*. AFZ/Der Wald (13): S. 695-699.
- HEYDECK, P., 2000: Bedeutung des Wurzelschwamms im Nordostdeutschen Tiefland AFZ/ Der Wald, 14, S. 742-744
- LAUSITZER BRAUNKOHLN AKTIENGESELLSCHAFT (LAUBAG), 2000: Schriftliche Mitteilung
- MEISSNER, B. & WYSS, D., 2002: Waldmanagement in der Mongolei – Fernerkundung und GIS unterstützen "Naturschutz und Randzonenentwicklung". In: Publikation der DGPF, S. 143-150.
- SCHATTAJEV A. W., 1987: Wurzelschwamm *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref. in den Kiefernstreifenwäldern Kasachstans und die biologische Begründung von Maßnahmen zum Schutz der Kiefernkulturen. Die Dissertation zur Erlangung den wissenschaftlichen Grades Doktor rerum naturalium. Swerdlowsk, 133 S.
- SCHATTAJEV, A.W., 2001: Verwendung des Systems zum integrierten Schutz der Kiefern gegen den Wurzelschwamm (*Heterobasidion annosum*) zur Wiederherstellung der Kiefernwälder im Zwischenstromland Ob und Irtisch in Südwestsibirien. – The problems of Altai forestry and forest restoration: Report abstracts of the First International Conference (April, 25. - 26, 2001, Barnaul), Altai State University, S. 116- 118.
- WÜNSCHE, M.; SCHUBERT, A.; LORENZ, W.D., 1970: Die Bodenformen der Kippen und Halden im Braunkohlengebiet südlich von Leipzig. Landeskultur 11: S. 317-338.

Steigerung der Genauigkeit von Digitalen Geländemodellen im Küstenbereich aus Laserscannermessungen

ALEXANDER BRZANK¹⁾, PETER LOHMANN¹⁾

Zusammenfassung: Digitale Geländemodelle, abgeleitet aus Laserscannermessungen, werden seit mehreren Jahren durch zuständige Landes- und Bundesbehörden als wertvolle Geoinformation zur Erfüllung der hoheitlichen Aufgaben verwendet. Dabei müssen Wasser- und Nichtwasserbereiche voneinander getrennt werden, da die Wasseroberfläche, welche der Laserpuls in der Regel nicht durchdringt, nicht der gesuchten Geländeoberfläche entspricht. Die Segmentierung von Wasser- und Nichtwasserflächen aus den Laserscannerdaten (Höhe und Intensität) erfolgt bisher durch einen einfachen Höhengrenzwert, wodurch Wasserflächen nur unzureichend extrahiert werden können. Das hier vorgestellte Verfahren basiert auf der Suche nach Wasserflächen in lokalen Höhenminima des Digitalen Oberflächenmodells mit anschließendem überwachten Regiongrowing im Höhen- und Intensitätskanal sowie der Ermittlung einer Trendfläche.

1 Einleitung

Im Rahmen des Küstenschutzes werden an der Nordseeküste seit einigen Jahren regelmäßig Laserscannerbefliegungen durchgeführt. Ziel dieser Befliegungen ist die Ableitung von hochgenauen Digitalen Geländemodellen der Watt- und Küstenbereiche. Durch die Analyse dieser Digitalen Geländemodelle und Vergleich mit den Messungen vergangener Jahre werden wichtige Erkenntnisse gewonnen. So können Lage- und Höhenveränderungen von bedeutsamen Objekten des Küstenschutzes wie Deichen oder Dünen, Verschiebungen der Land-Wasser-Verteilung sowie Änderungen von Prielen und Vorlandkanten festgestellt werden. Diese Geoinformationen benutzen die jeweiligen Fachbehörden des Bundes sowie der Länder als wichtiges Hilfsmittel für die Durchführung von Planfeststellungsverfahren mit dem Ziel des Neu- oder Ausbaus von Küstenschutzanlagen, der Vertiefung von Fahrrinnen und ähnlichen Maßnahmen. Da die Punktdichte von Laserscannermessungen deutlich höher ist als die der Schiffs-Peilmessungen, wird der Küstenbereich bevorzugt bei Niedrigwasser befliegen. Dadurch ist ein Großteil der Wattfläche nicht von Wasser bedeckt. Trotzdem verbleibt ein Teil des Wassers in den Prielen des Watts, die sich einem Flussdelta ähnlich durch das Watt erstrecken. In kleinen Senken und Mulden des Watts sammelt sich ebenfalls häufig Wasser, welches bei Niedrigwasser nicht mehr abfließt.

Analog zu den im aufgenommenen Gelände enthaltenen Vegetationsflächen, handelt es sich bei vorhandenen Wasserflächen nicht um die gesuchte Geländeoberfläche. Sie sind aber in dem aus den Laserscannerdaten abgeleiteten Digitalen Oberflächenmodell enthalten, da der Laserpuls in der Regel nicht in die Wasserfläche eindringt, sondern an der Oberfläche reflektiert wird. Um ein hochgenaues Digitales Geländemodell zu erhalten, müssen die Wasserflächen erkannt und aus der Berechnung des Digitalen Geländemodells ausgeschlossen werden.

¹⁾ Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover

Ziel eines Partnerprojektes zwischen der Universität Hannover und beteiligter Fachbehörden ist die automatisierte Extraktion von Wasserflächen aus Laserscannerdaten des Watt- und Küstenbereiches zur Steigerung der Genauigkeit des abgeleiteten Digitalen Geländemodells. Da aufgrund der Gezeiten nur zwei begrenzte Zeitfenster pro Tag für die Befliegung der Küste zur Verfügung stehen, sowie aus Kostengründen, welche sich durch die zeitgleiche Erhebung von Laserscanner- und Multispektraldaten ergeben würden, soll die Erkennung von Wasserflächen ohne Multispektraldaten erfolgen.

2 Verfahren zur Trennung von Land- und Wasserflächen mit Laserscannerdaten

Das bisher durch die beteiligten Behörden praktizierte Verfahren zur Trennung von Land- und Wasserflächen mit Hilfe von Laserscannerdaten bedient sich fester Annahmen über die Wasserhöhe.

In Abhängigkeit vom jeweiligen Befliegungszeitpunkt für das zu segmentierende Gebiet wird ein Höhengrenzwert angesetzt. Dieser Höhengrenzwert entspricht der geschätzten Meereswasserhöhe zum jeweiligen Zeitpunkt. Da eine simultane Erfassung größerer Gebiete aufgrund des Messprinzips des Airborne Laserscanning, der streifenweisen Abtastung des Küstenbereiches, nicht möglich ist, entspricht die tatsächliche Wasserhöhe nicht überall dem Schwellwert. Zudem beeinflussen Wind und die Gezeitenwirkung die Wasserhöhe innerhalb der Priele, so dass selbst für kleinere Bereiche die Wasserhöhe unterschiedlich ist. Somit werden viele Bereiche falsch klassifiziert. Weiterhin ist zu bemängeln, dass auf den Wattflächen verbleibende, höher liegende Wasserflächen nicht erkannt werden können.

Abbildung 1 verdeutlicht die Klassifizierung sowie deren Mängel. Der Hauptpriel wird vollständig erkannt. Der Nebenspriel sowie die stehende Wasserfläche werden fehlerhaft als Landfläche klassifiziert, da sie oberhalb des Schwellwertes liegen.

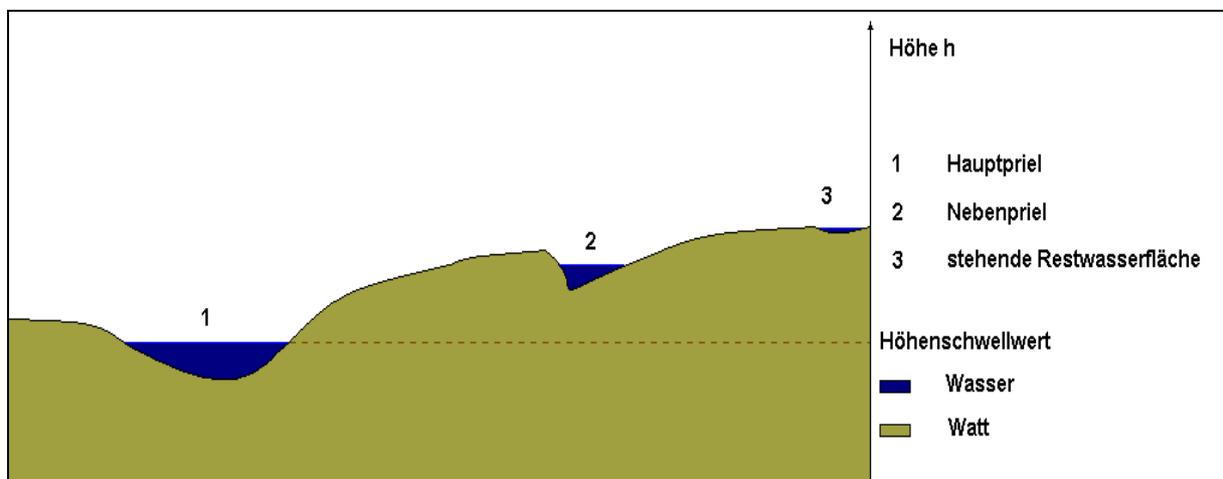


Abb. 1: Segmentierung von Wasser- und Landflächen durch Schwellwertbildung

Ein anderer Ansatz wird durch Brockmann und Mandlbürger (2001) verfolgt. Ausgehend von Höhendaten aus Laserscannermessungen und Gewässerbettquerprofilen war es das Ziel des Projektes, ein Digitales Geländemodell des Wasserlaufes der Oder aufzubauen. Aus eindeutig identifizierbaren Wasserpunkten wurden alle 100 m 1D-Wasserspiegellagen abgeleitet. In einem nachfolgenden 2-stufigen Prozess, welcher aber zwingend auf Höheninformationen des Gewässerbetts angewiesen ist, ermittelte man die Land-Wasser-Grenze.

3 Eigenschaften und Erkennung von Wasserflächen in Laserscannerdaten

Wasserflächen haben das Bestreben, die kleinstmögliche potentielle Energiemenge E_{pot} zu besitzen. Befinden sich zusammengehörende Wassermengen in Ruhe, so ist die potentielle Energie überall auf der Oberfläche gleich. Ebenso ist die Höhe, sofern man von einer räumlich begrenzten Wasserfläche ausgeht, quasi identisch. Befinden sich zusammenhängende Wassermengen in Ruhe und haben somit die für sie geringste mögliche potentielle Energie, so entsprechen die ruhigen Wasseroberflächen lokalen Höhenminima im Gelände. Somit können potentielle Wasserflächen durch die Extraktion von lokalen Minima im Digitalen Oberflächenmodell gewonnen werden.

Im Intensitätskanal zeichnen sich Wasserflächen in der Regel durch geringe Intensitätswerte aus. Ursache sind die physikalischen Eigenschaften des Wassers. Zum einen wird ein Großteil der emittierten Strahlungsenergiemenge E_{emi} absorbiert (Abbildung 2). Dadurch wird nur ein geringer Teil der ausgesandten Energiemenge reflektiert. Zum anderen verhält sich eine ebene Wasseroberfläche nicht wie ein Lambertischer Strahler. Aufgrund des Rayleigh Kriterium (Pedrotti, 1987) und der daraus resultierenden spiegelnden Eigenschaft von ruhigen Wasseroberflächen kommt es zur gerichteten Reflexion. Je nach räumlicher Stellung zwischen Flugzeug, Richtung des ausgesandten Laserpulses sowie Ausrichtung der Wasseroberfläche gelangt nur ein sehr geringer Anteil der ausgesandten Energiemenge E_{emi} zum Detektor zurück (Frauendorfer 2002). Oft ist diese Energiemenge so gering, dass eine Streckenmessung nicht möglich ist.

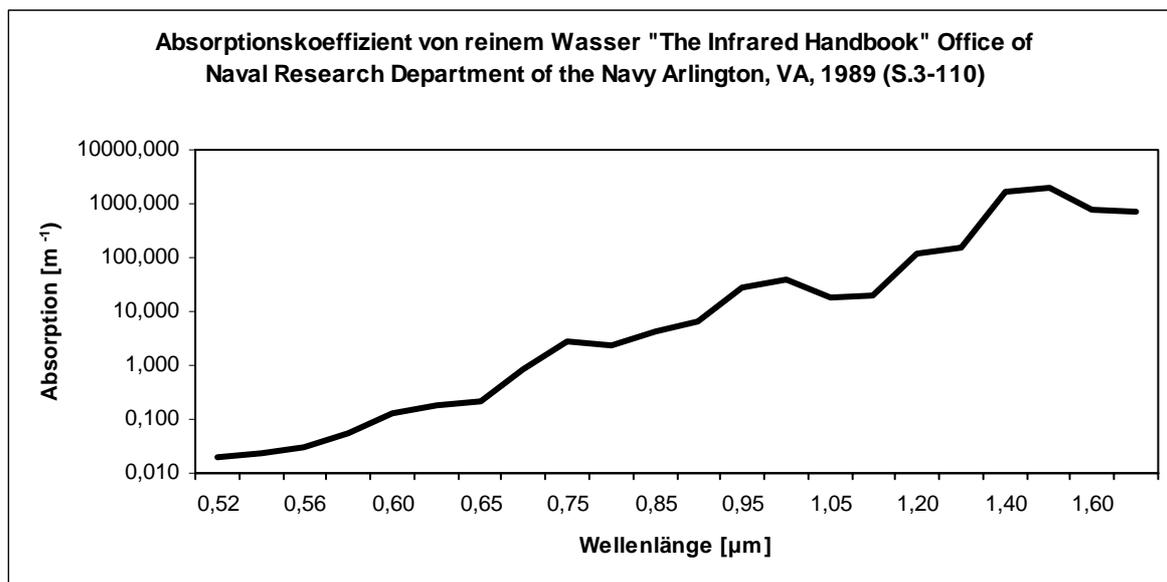


Abb. 2: Absorptionskoeffizient von reinem Wasser (Wolfe et al, 1989)

4 Ansatz zur Segmentierung von Land- und Wasserbereichen

Aus den unter Punkt 3 erläuterten Überlegungen ergibt sich folgender grundsätzlicher Ansatz. Durch die Extraktion von lokalen Minima aus dem Digitalen Oberflächenmodell und anschließendem Nachweis von Wasserflächen durch den durchschnittlichen Intensitätswert des jeweiligen lokalen Minimums werden Quellbereiche gefunden. Aufgrund der zufälligen Messfehler, Wind und Gezeitenwirkung entsprechen die Quellbereiche nicht der gesamten gesuchten Wasserflächenmenge. Deshalb wird ein begrenztes, durch Überwachung des Höhen- und Intensitätskanals gesteuertes Regiongrowing durchgeführt, welches die gesamte,

zusammenhängende Wasserfläche extrahiert. Um auch geeignete Wasserflächen ermitteln zu können, wird eine Trendfläche in Form einer ausgleichenden Ebene berechnet.

4.1 Algorithmus zur Extraktion von Wasserflächen aus Laserscannerdaten

Im ersten Schritt werden die lokalen Minima im Digitalen Oberflächenmodell gesucht. Diese gewinnt man durch die Anwendung der Wasserscheidentransformation (Wegner et al., 1995), wobei man die gefundenen Bassins vorerst nicht auffüllt (Abbildung 3). Als Datengrundlage zur Ableitung der lokalen Minima wird ein grob skaliertes Digitales Oberflächenmodell (z.B.: eine Einheit entspricht einer Höhenauflösung von 30 cm) verwendet. Dies erfolgt aus zwei Überlegungen. Zum einen enthält das feine Digitale Oberflächenmodell lokale Minima aufgrund des Messrauschens des Laserscanners. Würde zum Beispiel eine horizontale Wasserfläche aufgemessen, so hätten die unregelmäßig verteilten Massepunkte und nachfolgend auch das daraus abgeleitete Digitale Oberflächenmodell aufgrund der zufälligen Messfehler unterschiedliche Höhen. Somit leitet man lokale Minima ab, die im aufgenommenen Gelände nicht existieren. Zum anderen sollen nur die lokalen Minima extrahiert werden, die sich durch einen aussagekräftigen Höhenunterschied von ihrer Umgebung absetzen. Um nur in den Höhenbereichen nach Wasserflächen zu suchen, in denen ihr Auftreten wahrscheinlich ist, wird die Suche nach lokalen Minima in der Höhe mit einem Schwellwert begrenzt.

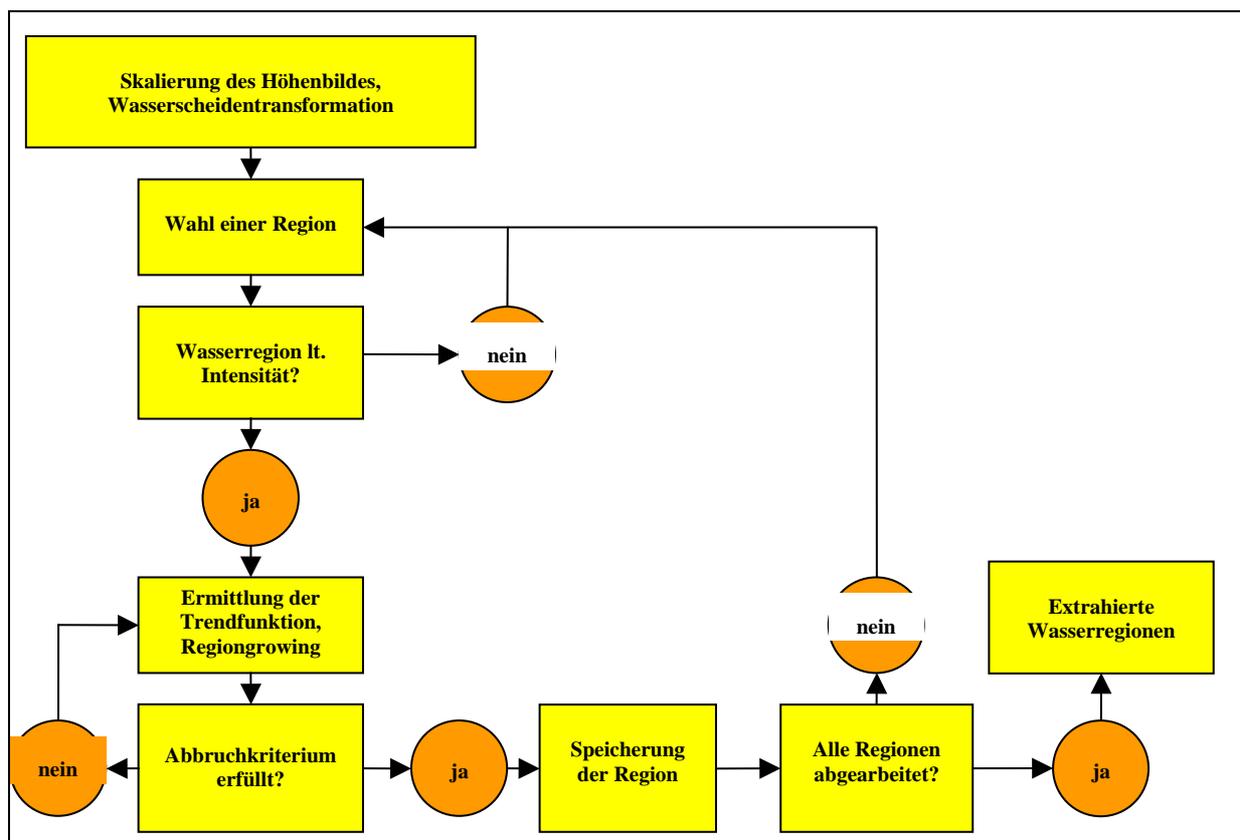


Abb. 3: Flussdiagramm zur Extraktion von Wasserflächen mit Höhen- und Intensitätsdaten

Nach der Extraktion der lokalen Minima wird für jede Region überprüft, ob es sich um eine Wasserfläche handelt. Dazu wird der jeweilige Mittelwert der Intensität aller Laserpunkte ermittelt. Liegt dieser unter einem durch den Bearbeiter vorgegebenen Höhenschwellwert, so wird das lokale Minimum als Wasserfläche erkannt. Liegt der Mittelwert oberhalb des Schwellwertes, so scheidet diese Region als Wasserfläche aus.

Im Folgenden wird aus den nicht skalierten Höhenwerten der Wasserregion eine ausgleichende Ebene berechnet. Anschließend dehnt man die Region durch Dilation mit einem Kreis als Strukturelement (Isometrie) so aus, dass die Region sich in alle Richtungen um jeweils ein Pixel ausbreitet. Nachfolgend wird jedes Randpixel anhand zweier Regeln überprüft, ob es sich um ein Wasser- oder ein Nichtwasserpixel handelt.

Regel 1:

Aufgrund der zufälligen Messfehler des Airborne Laserscannings, dem Einfluss von Wind sowie den Gezeitenkräften sind die Punkthöhen zusammenhängender Wasserflächen unterschiedlich. Durch Vorgabe eines diskreten Auffüllschwellwertes wird dieser Tatsache Rechnung getragen und das Regiongrowing sinnvoll begrenzt. Der Höhenschwellwert soll der erwarteten Standardabweichung der Höhenmessgenauigkeit sowie vermuteter Einflüsse durch Wind und Gezeitenwirkung entsprechen. Liegt der Höhenwert des jeweiligen Randpixels oberhalb der Summe der Höhenwerte von ausgleichender Ebene und dem Auffüllschwellwert, so wird das Randpixel nicht als Wasserpixel erkannt und von der dilatierten Wasserregion abgezogen. Liegt es unterhalb der Summe aus ausgleichender Ebene und Auffüllschwellwert, so verbleibt es als Wasserpixel in der Region. Sofern alle Randpixel nicht als Wasserpixel erkannt werden, so entfernt der Algorithmus alle Punkte des Umrings und extrahiert die verbleibende Region als Wasserfläche.

Regel 2:

Die 2. Regel überprüft die Intensitätswerte der Randpixel der dilatierten Region. Liegt der jeweilige Intensitätswert des Randpixels oberhalb eines durch den Bearbeiter festzusetzenden Schwellwertes, so handelt es sich um kein Wasserpixel. Es wird deshalb von der dilatierten Region entfernt. Ist der Intensitätswert kleiner als der vorgegebene Schwellwert, so geht der Algorithmus davon aus, dass es sich um ein Wasserpixel handelt. Es verbleibt in der dilatierten Region. Sofern alle Randpixel oberhalb des Schwellwertes liegen, ist der Rand der Wasserfläche erreicht. Die Randpixel werden entfernt und die Wasserfläche wird extrahiert.

Sofern nicht alle Randpixel als Nichtwasserpunkte erkannt und entfernt wurden, überprüft der Algorithmus, ob die Randpixel weitere lokale Minima berühren. Findet der Algorithmus weitere lokale Minima innerhalb der dilatierten Region, so werden sie mit ihr vereinigt.

Sind nach Anwendung von Regel 1 und 2 nicht alle Randpixel der dilatierten Region als Landpixel erkannt worden, so wird die verbleibende Region erneut dilatiert. Der Kreislauf aus Dilation, Extraktion der Randpixel sowie Überprüfung der Randpixel gemäß Regel 1 und 2 auf ihre Klassenzugehörigkeit wird solange durchgeführt, bis die Randpixel vollständig als Landpunkte erkannt und somit die Begrenzung der Wasserfläche erreicht wurde.

4.2 Einsatz einer Trendfläche

Durch Gezeiten, Strömung, Wind und andere natürliche Phänomene in der Natur sind die Wasserhöhen innerhalb einer zusammengehörigen Fläche oftmals ungleichmäßig. Um dieser Tatsache im Algorithmus Rechnung zu tragen, wird das Regiongrowing im Höhenkanal nicht auf die Summe der durchschnittlichen Höhe des lokalen Minima sowie des Höhenschwellwertes begrenzt, sondern vor jeder Dilation eine aktuelle Trendfläche

abgeleitet. Somit können auch geneigte Wasserflächen, vorkommend in Flüssen und Prieln, mit diesem Algorithmus vollständig erkannt werden.

5 Praktischer Test des Algorithmus

Aufgrund bisher noch fehlender Datengrundlagen für Wattflächen wurde der Ansatz mit zwei Testdatensätzen der Firma Toposys durchgeführt. Der erste Testdatensatz stammt aus der Befliegung der Nordseeinsel Sylt. Er enthält zwei Wasserflächen, einen großen Meereswasserbereich mit starker Wellenbildung und eine schmale, oberhalb des Meereswasserspiegels gelegene Wasserlache. Im zweiten Testdatensatz wurde ein Abschnitt der Elbe beflogen. Neben der Elbe beinhaltet dieser Datensatz weiterhin eine Reihe höher gelegener Seen.

Abbildung 4 zeigt das Ergebnis der Wasserextraktion mit Höhen- und Intensitätsdaten aus Laserscannermessungen. 98.5 % der vorhandenen Wasserflächen wurden durch den Algorithmus extrahiert. Neben der Meereswasserfläche konnte ebenfalls ein großer Teil der höher gelegenen Wasserlache ermittelt werden. Im Meereswasserbereich wurden einige Wasserflächen nicht erkannt. Hier handelt es sich um höher gelegene Wellenberge. Da ein maximaler Auffüllbetrag von 12 cm zu Grunde gelegt wurde, können diese Bereiche nicht extrahiert werden, da der Höhenunterschied zwischen Wellental und Wellenberg zum Teil größer als 30 cm ist. Diese Wasserflächen können aber problemlos in einem Nachbearbeitungsschritt ermittelt und der extrahierten Wasserfläche hinzugefügt werden.

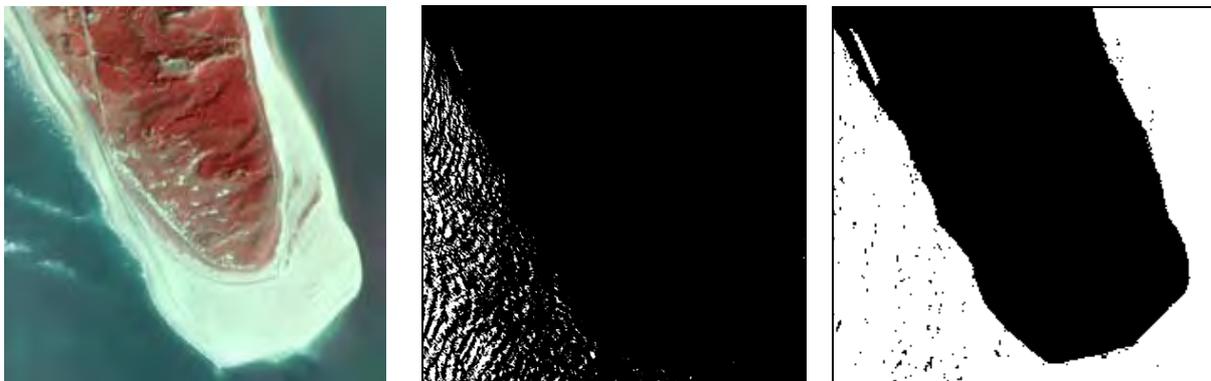


Abbildung 4: Ableitung von Wasserflächen aus dem Testdatensatz Sylt

Links: Color-Infrarot-Darstellung
Mitte: Lokale Minima im grob skalierten Höhenbild
Rechts: Durch den Algorithmus extrahierte Wasserflächen

	Fläche [m ²]	Vollständigkeit [%]	Richtigkeit[%]
Wasser, Referenz	455717	100.0	-
Wasser, extrahiert	448944	98.5	100.0
Wasser, richtig klassifiziert	444310	97.5	99.0
Wasser, falsch klassifiziert	4634	1.0	1.0

Tab. 1: Auswertung der extrahierten Wasserflächen des Testgebietes „Sylt“

Die extrahierte Uferlinie entspricht in einzelnen Regionen nicht der wahren Uferlinie, sondern erstreckt sich in den periodisch von Wellen überspülten Strandbereich. Dieser nasse Sand spiegelt sich im Intensitätskanal durch sehr geringe Werte, die unterhalb des angesetzten

Intensitätsschwellwertes liegen, wieder. Deshalb gelingt es dem Algorithmus nicht vollständig, das Regiongrowing an der eigentlichen Land-Wasser-Grenze zu beenden.

Auch im zweiten Testgebiet (Abbildung 5) konnten die Wasserflächen fast vollständig aus den Höhen- und Intensitätsdaten der Laserscannermessung abgeleitet werden (Tabelle 2). Hervorzuheben ist die exakte Erkennung der südlichen Uferlinie der Elbe. Lediglich einzelne kleinere, isolierte Seen wurden nicht erkannt, da sie keine lokalen Minima im groben Höhenbild sind. An dieser Stelle offenbart sich ein Schwachpunkt des Ansatzes. Nach Festlegung des Skalierungsfaktors erfolgt die Festlegung der Höhe des Stufenübergangs willkürlich. Durch eine weitere Skalierung mit dem gleichen Faktor, wobei aber der Stufenübergang um den Betrag Faktor/2 verschoben ist, kann man weitere lokale Minima ableiten. Zukünftig ist zu untersuchen, ob durch andere Maßnahmen wie der Tiefpassfilterung des Digitalen Oberflächenmodells im Frequenzraum nachfolgend ein grobes Höhenbild erstellt werden kann, welches alle repräsentativen lokalen Minima enthält.



Abbildung 5: Ableitung von Wasserflächen aus dem Testdatensatz Elbe

Links: Color-Infrarot-Darstellung
 Mitte: Lokale Minima im grob skalierten Höhenbild
 Rechts: Durch den Algorithmus extrahierte Wasserflächen

	Fläche [m ²]	Vollständigkeit [%]	Richtigkeit[%]
Wasser, Referenz	463771	100.0	-
Wasser, extrahiert	446363	96.2	100.0
Wasser, richtig klassifiziert	438658	94.6	98.3
Wasser, falsch klassifiziert	7705	1.7	1.7

Tab. 2: Auswertung der extrahierten Wasserflächen des Testgebietes „Elbe“

Innerhalb der Elbe wurden einige Wasserbereiche nicht erkannt, da die jeweiligen Intensitätswerte oberhalb des Schwellwertes liegen. Diese Bereiche setzen sich streifenweise mit konstantem Abstand über das aufgenommene Gebiet fort. Es ist zu vermuten, dass diese Streifen genau die Stellen markieren, welche das Flugzeug senkrecht überflogen hat. Aufgrund der gerichteten Reflexion gelangt ein Großteil der senkrecht nach unten ausgesandten Strahlung zum Empfänger zurück. Analog zu den Wellenbergen im Testgebiet Sylt können aber auch diese nicht erkannten Wasserbereiche problemlos nachträglich erfasst werden.

6 Danksagung

Wir bedanken uns bei der Firma Toposys, die uns die Testdatensätze zur Verfügung gestellt hat. Des Weiteren bedanken wir uns bei den Partnerbehörden dieses Projektes, namentlich das Amt für Ländliche Räume Husum, der Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft und Küstenschutz Norden sowie der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nordwest für die fachliche und infrastrukturelle Unterstützung des Projektes.

Literaturverzeichnis

- FRAUENDORF, J.: Entwicklung und Anwendung von Fernerkundungsmethoden zur Ableitung von Wasserqualitätsparametern verschiedener Restseen des Braunkohlentagebaus in Mitteldeutschland, Dissertation Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2002
- KOU, L., LABRIE, D. CHYLEK, P.: Refractive indices of water and ice in the 0.65 – 2.5 μ m spectral range. 1993, Applied Optics, 32, 3531-3540.
- MOREL, A.: Optical properties of pure water and pure sea water. IN: JERLOV, N.G. & E. Steemann Nielsen (1974): Optical Aspects of oceanography. Academic press London, 1-24.
- PEDROTTI, F.L., PEDROTTI, L. S.: Introduction to Optics, Prentice-Hall, Englewood Cliffs (New Jersey), 1987.
- POPE, R. M., FRY, E. S.: Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water, II. Integrating cavity measurements., 1997, Applied Optics, 36, 8710-8723.
- WEGNER S., HARMS T., BUILTJES J.H., OSWALD H., FLECK E.: The watershed transformation for multiresolution image segmentation. Proc. 8th International Conference on Image Analysis and Processing, San Remo, Italien, September 1995, S. 31-36.
- BROCKMANN, H., MANDLBURGER, G.: Aufbau eines Digitalen Geländemodells vom Wasserlauf der Grenzoder, Dreiländertagung „Geodäten schaffen Verbindungen“, Konstanz September 2001
- WOLFE; W. L., ZISSIS, G. J.: The infrared handbook, 1989, The Infrared Information Analysis Center; Environmental Research Institute of Michigan

Die Qualität der SRTM-90m Höhendaten im Hinblick auf Anwendungsmöglichkeiten in den Geo- und Umweltwissenschaften

WOLFGANG CZEGKA¹

Abstract: On November 1st USGS released to public the SRTM C-Band digital elevation model data for Eurasia via ftp. According to the Freedom of Information Act the data is public. This is the first time a continuous and consistent DEM with 90m resolution is available for Europe south of 60°N latitude. A random sample check shows that the quality of SRTM DEM data is close to commercial DEM data quality distributed by the land surveys.

SRTM raw DEMs generally have voids in two cases - the radar signal hit a water surface or the surface of a slope, cliff, or canyon bottom could not be seen by the Shuttle. Therefore SRTM DEM raw data has to be processed further to eliminate these voids.

1 Einleitung

Ohne die sonst übliche Öffentlichkeitspräsentation hat der United States Geological Service (USGS) am 01. November 2003 die Rohdaten der 90m Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) C-Band Höhenmodelle (DEM) für Europa zum FTP-Download freigegeben (CZEGKA 2003). Am 01.04.2004 erfolgte die Freigabe der Rohdaten für den gesamten afrikanischen Kontinent und den Nahen Osten. Mit dem Start der US amerikanischen Raumfähre Endeavour am 11. Februar 2000 begann die bisher einzigartige Mission zur Kartierung der Erde, an der Raumfahrtinstitute aus Deutschland (DLR), USA (NASA-JPL, NIMA) und Italien (ASI) beteiligt waren. Im Rahmen der interferometrischen Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) wurde die Erde innerhalb von nur elf Tagen mit zwei Radarsystemen an Bord der Endeavour 182-mal umrundet. Dabei wurden hochgenaue topografische Rohdaten der Erdoberfläche aufgezeichnet. Ziel der Mission war es, hoch aufgelöste, einheitlich erhobene und flächendeckende digitale Höhendaten der Erde im Bereich zwischen dem 60. Grad nördlicher und dem 54. Grad südlicher Breite zu erheben. Nach Ablauf des Projekts liegen zum ersten Mal für fast 80% der festen Erdoberfläche ein einheitliches mittelauflösendes Oberflächenmodell vor.

Die Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) verwendete zur Datenerfassung mit der Radarinterferometrie ein aktives Einpass-Verfahren. Während der SRT Mission arbeiteten zwei Radarsysteme gleichzeitig: das deutsche X-SAR-Instrument (3,1cm Wellenlänge) und das amerikanische C-Radar-Instrument (5,6 cm). Das C-Band-Radar tastete die Erdoberfläche in 225km breiten Streifen ab, das X-SAR-System erfasste innerhalb dieses Streifens einen Bereich von 50km Breite. Seit Ende der Mission im Februar 2000 wurden die Rohdaten aufbereitet.

2 Digitale Oberflächenmodelle

Digitale Oberflächenmodelle (DOM) beschreiben das Kontinuum einer Oberfläche durch eine finite Menge von Punkten im dreidimensionalen Raum (xyz-Tripel). Die mit verschiedenen Methoden gemessenen xyz-Tripel sind meist unregelmäßig auf der Oberfläche verteilt.

¹ Wolfgang Czegka, M.Sc., Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Schadstoffdynamik, Karl-Tauchnitz-Str. 1, D- 04107 Leipzig, e-mail: czegka@saw-leipzig.de

Aus den unregelmäßig verteilten xyz-Tripeln werden – über verschiedene Interpolationsverfahren (z.B. Kriging) – quadratische Raster berechnet.

Üblich sind die Begriffe ‚Digitales Geländemodell‘ (DGM, engl. digital terrain model - DTM) und ‚Digitales Höhenmodell‘ (DHM, engl. digital elevation model - DEM). Hier herrscht im Sprachgebrauch leider einige Verwirrung. Als ein DHM werden digital gespeicherte Höhenpunkte einer Oberfläche bezeichnet. Bei einem digitalen Höhenmodell muss immer angegeben werden, um welche Oberfläche es sich handelt (z.B. DHM der Grundwasseroberfläche, DHM der Erdoberfläche, DHM der Vegetation und der Bebauung = Landschaftsmodell). Im Gegensatz dazu bezeichnet das DGM die digital gespeicherten xyz-Tripel der Erdoberfläche. Ein DGM ist demnach ein Spezialfall des Begriffs DHM (DGM = DHM der Erdoberfläche).

Das hier beschriebene SRTM-Oberflächenmodell ist ein digitales Landschaftsmodell, da jedes Landschaftselement (Vegetation, Bebauung) abgebildet wird. Dennoch werden die (i.e. Sinn sachlich unrichtig) SRTM Oberflächenmodellldaten meist als DEM – DHM bezeichnet.

Man unterscheidet:

- Grob auflösende Oberflächenmodelle (Rasterweiten > 300m),
- Mittel auflösende Oberflächenmodelle (Rasterweiten 10-300 m; i.d.R. 25-50 m),
- Fein auflösende Oberflächenmodelle (Rasterweiten <10 m).

Weiterhin werden nach BILL 1999 DOM nach strukturellen Gesichtspunkten unterschieden:

- Oberflächenmodelle mit gleichmäßigen Punktlagen
- Oberflächenmodelle mit unregelmäßig verteilten Punktlagen
- Oberflächenmodelle mit hybrider Punktanordnung

Das SRTM-Oberflächenmodell stellt demnach ein mittel auflösendes DOM mit gleichmäßiger Punktlage dar.

Für DGM und DHM gibt es keine offenen und verbindlichen Dateiformate. Das einfachste Format ist eine Text-Datei mit den x-, y- und z-Werten eines Tripels in jeweils einer Zeile. De-facto-Standard ist das ‚DEM‘-Format (Text-Format) des USGS. Weit verbreitete kommerzielle binäre Formate sind zum Beispiel die ‚.grd‘-Grid-Dateien des Programms SURFER (Golden Software Inc.), Grid-Dateien des Programms ARC/INFO - ArcGIS (ESRI). Ebenfalls weit verbreitet ist auch das DTED Format des USGS.

3 DOM Daten im Vergleich

Außerhalb von Deutschland, Österreich, der Schweiz (sog. D-A-CH-Region), Frankreichs, der Beneluxstaaten, Italiens, Großbritanniens, Skandinaviens, der USA und Kanadas wird die Beschaffung von mittel oder hoch auflösenden topografischen Daten in der Regel sehr problematisch sein. In Tabelle 1 ist die theoretische Verfügbarkeit von mittelauflösenden DEM und topografischen Karten in Prozent der Abdeckung der jeweiligen Kontinente aufgelistet. Theoretisch deshalb, da die in der Tabelle aufgenommenen Daten und Karten außerhalb der o.g. Länder in der Regel aus „Sicherheitsgründen“ nicht allgemein zugänglich sind. Tabelle 2 gibt die weltweit verbreiteten DOM wider. Hier sind in der Kategorie mittelauflösendes Modell nur die durch SRTM gewonnenen Modelle vorhanden. Tabelle 3 zählt die Satelliten auf, deren Daten zur Generierung von mittelauflösenden Oberflächenmodellen herangezogen werden können. Die horizontale Auflösung des DOM ist dreimal größer als die Auflösung der Fernerkundungsdaten. Aus Kostengründen dürften Fernerkundungsdaten des ASTER-Satelliten bevorzugt zur Generierung von Oberflächenmodellen verwandt werden (vgl. KLUG 2002).

Eine Tabelle mit den in der D-A-CH-Region verfügbaren mittelauflösenden DOM ist in CZEGKA & BRAUNE 2004 aufgelistet. Dabei ist auf folgende Punkte hinzuweisen:

- fast alle der von Vermessungsämtern / landeseigenen Geodatenbetrieben vertriebenen Oberflächenmodelle unterliegen restriktiven Lizenz- und Nutzungsbedingungen,
- gerade die föderale Struktur der Bundesrepublik Deutschland bedingt eine heterogene Datenlandschaft. Die angebotenen DOM unterscheiden sich nicht nur in ihrer Struktur, sondern auch in ihrer Datengrundlage,
- teilweise sind auch für Mitteleuropa keine Daten verfügbar (z.B. Luxemburg),
- es fallen die recht hohen Preise auf. So kostet eine Einzelplatzlizenz des DGM 50 des BKG für die gesamte Bundesrepublik ca. 38 000 €, eine ebensolche des DHM 50 von Baden Württemberg schlägt mit 25 000 € zu Buche.

Weitere Informationen sind über die Vermessungsverwaltungen abrufbar.

4 Die SRTM-3 Daten

Die SRTM-3 (3 Bogensekunden, 3", entspricht ca. 90m) Daten wurden aus den SRTM-1 (1", entspricht ca. 30m) erzeugt. Sie liegen in Kacheln von jeweils 1° geogr. Länge und 1° geogr. Breite im binären Datenformat ‚.hgt‘ (heightfield) vor. Jede Kachel hat 1201 x 1201 Rasterzellen ($1200 * 3'' = 1^\circ$, eine Rasterzeile/-spalte Überlappung). Das Format folgt der DTED-Konvention (<http://www.nima.mil/ast/fm/acq/89020B.pdf>). Die Höhenwerte der Rasterzellen liegen ganzzahlig in Meter bezogen auf WGS84 EGM96 vor (vgl. <http://earth-info.nima.mil/GandG/wgsegm/>). Sie werden als 16-bit signed integer Datensatz (16-bit-Integer mit Vorzeichen, Zahlenbereich von -32768 bis 32767, $32767 = 2^{15} - 1$) in einem binären Raster abgelegt. Dieser Binär-Datensatz enthält keinen Header, die Höhenwerte sind nacheinander abgelegt (den Höhendaten der ersten Reihe folgen die der zweiten usw.). Die Anordnung der Bytes folgt dem Motorola Standard für Großrechner (‚big endian‘) mit dem signifikanten Byte zuerst. Zahlenwerten von -32767 bis 32767 entsprechen der Höhe der Rasterzelle (in Meter), -32768 kennzeichnet fehlende Werte (‚missing values‘).

SRTM-3 Daten unterscheiden sich vom DTED Standard in folgenden Punkten signifikant:

1. Sie sind nicht nachbereitet und können Leerstellen (voids) sowie Artefakte wie Spitzen (‚spikes‘) oder Dellen (‚wells‘) enthalten.
2. Küstenlinien sind unscharf. Größere Wasserflächen erscheinen uneben.
3. SRTM-3 Daten wurden nicht mit vorhandenen Vergleichsdaten abgeglichen.
4. Das Datenformat ähnelt, aber gleicht nicht den DTED Standards.
5. Die Höhenangaben sind relativ zum WGS84 Ellipsoid (nicht Geoid) oder zu der Oberfläche, die zur Bestimmung der Grundkontrollpunkte genutzt wurde.

5 Datenpolitik und Preise

SRTM C-Band Daten werden vom USGS in zwei Qualitätsstufen angeboten, die Qualitätsstufe SRTM-1, die auf einen 1" (30m) Gitter beruht und die daraus abgeleitete Qualitätsstufe SRTM-3 mit einem 3" (90m) Gitter. Die SRTM-3 werden bei den von JPL prozessierten Daten direkt aus der Mittelung von 3 x 3 SRTM-1 Zellen errechnet. Die von NIMA angekündigten SRTM-3 Daten stellen die Mittelzelle einer 3x3 Matrix von SRTM-Zellen dar. Neben einer Vergrößerung der Auflösung wirkt dieses Vorgehen wie ein Glätten der Daten durch

Filtern des Hintergrundrauschens. SRTM-3 Daten sind mit einem Internet-Browser unter der URL <ftp://edcs9.cr.usgs.gov/pub/data/srtm/Eurasia/> abrufbar, es bedarf keines expliziten FTP Client. Die Dateinamen geben die geografische Breite und Länge der 1°x1° Kachel an, z.B. hat die Kachel N48E008 („Straßburg“) ihre südwestliche Ecke bei 48° nördlicher Breite und 8° östlicher Länge (Genauer beziehen sich die Koordinaten auf das geometr. Zentrum des südwestlichsten 3" x 3" pixels). Zur Orientierung ist deshalb ein alter Schulatlas nützlich.

Mit Stichtag 04.05.2004 waren die Daten noch nicht in das „nahtlose“ Geodatenportal <http://seamless.usgs.gov/> eingearbeitet.

Die Rohdaten sind nach dem Freedom of Information Act (FOIA) als public domain (freie Geodaten im Sinne von freegis.org) zu bezeichnen. Näheres zu freien Geodaten kann man unter <http://freegis.org> erfahren.

Infolge der Ereignisse vom 11. September 2001 wird aus „Sicherheitsgründen“ nur die Qualitätsstufe SRTM-3 ausgeliefert. Die SRTM-1 (1")-Daten sind vorhanden und werden im militärischen Bereich genutzt. Diese sind nur für wissenschaftliche Zwecke auf Anfrage abrufbar.

Die genutzten Test-Daten wurden versuchsweise mittels analogem Modem in einer „normalen“ Internet by call Verbindung geladen. Im Schnitt dauerte der Transfer einer 1° x 1° Kachel rund 5 Minuten. Bei einem marktüblichen Preis von 0,99ct/min für eine Internet by call Verbindung entstehen also rund 5ct Transferkosten pro Kachel. Die Bundesrepublik Deutschland ist mit 68 Kacheln (3,36 €), Österreich mit 22, die Schweiz mit 12 Kacheln abzudecken. Das Bundesland Baden Württemberg benötigt 11 Kacheln (entspricht Transferkosten von 0,55 €). Die Transfer- Kosten betragen rund 1/10 000 bis 1/50 000 der Kosten vergleichbarer Daten.

6 Genauigkeit

Zur Qualitätsabschätzung von digitalen Oberflächenmodellen existieren keine ISO/DIN Normen oder allgemein akzeptierte Standards für die Qualitätssicherung.

Häufig wird die Qualität eines DOM durch Vergleich mit einem anderen ermittelt. Das Referenz-DOM sollte ‚genau‘ eine Qualitätsklasse besser als das zu vergleichende DOM sein. Weitere Qualitätsmerkmale können aus GIS-Datenmodellen abgeleitet werden (vgl. Kresse, Fadaie 2004). Herkunft, Positionsgenauigkeit und logische Konsistenz sind Kriterien einer Qualitätsbewertung. Hier wird eine stichprobenartige Qualitätsabschätzung durchgeführt. Bezüglich der Genauigkeit der SRTM-Daten liegen vorwiegend Arbeiten über das X-Band Höhenmodell der DLR vor (vgl. Übersichtsarbeit von MOLL 2003)

Für die Stichprobe wurden zwei typische mitteleuropäische Landschaften, eine Mittelgebirgsregion (Thüringer Wald - Thüringer Becken) und eine Übergangslandschaft (Holzland – Leipziger Tieflandsbucht), ausgesucht. Als Vergleichs- („Referenz“-) DOM diente das in der TOP50-Serie der Landesvermessungsämter hinterlegte 50m DHM. Leider geben die Herausgeber der Reihe TOP50 keine Metadaten zu dem hinterlegten Höhenmodell an. Zu diesen beiden Regionen wurden zwei Versuchsreihen gefahren.

1) In jeder 1°x1° SRTM-Kachel, die eine Vergleichsregion abdeckt, wurden per Zufallsgenerator 100 Punkte ausgewählt. Ein Zufallsgenerator wurde gewählt, um jeden Landschaftstyp (Stadt, Wald, Wiese, Feld, Braunkohletagebau...) zu erfassen. Zu diesen Punkten wurden jeweils die DOM-Höhen aus dem SRTM-3 DEM und dem DHM der TOP 50 bestimmt.

2) Aus der in der TOP50 enthaltenen topografischen Karte wurde in jeder Kachel manuell 30 Punkte ausgewählt und zu diesen Punkten die geografischen Koordinaten und die Höhe (ab-

solute Höhe über NN) bestimmt. Zu diesen Punkten wurden zusätzlich die Höhenangaben aus dem SRTM DEM und dem DHM der TOP50 ermittelt.

6.1 Mittelgebirgsregion:

SRTM DOM und das DHM der TOP50 zeigen eine sehr hohe Korrelation (0,9991). Die mittlere Streuung beider Modelle beträgt 6,2m, die Standardabweichung beträgt 7,9m.

Im Mittel wichen die aus dem SRTM DOM gewonnenen Höhen um 0,15m von denen aus der topografischen Karte gewonnenen Punkten ab. Die Standardabweichung beträgt hier 4,4m. Die mittlere Abweichung des ‚Referenz-DHM‘ aus der TOP50 beträgt dagegen 7m, die Standardabweichung 5,9m.

6.2 Übergangslandschaft:

Bei der Zufallsauswahl fiel ein Punkt in eine SRTM-Leerstelle (Braunkohletagebau) die Korrelation war deshalb mit 0,9666 weniger gut. Lässt man diesen Punkt beim Vergleich der beiden Höhenmodelle weg, so erreichte auch hier die Korrelation mit 0,9995 einen sehr guten Wert. Die mittlere Abweichung zwischen den beiden DOM beträgt 1,6m (0,3m ohne void), die Standardabweichung beträgt 3,6m (2,3m ohne void).

Die aus dem SRTM DOM gewonnenen Höhen wichen in der Übergangslandschaft im Mittel um 1,2m ab, Standardabweichung 1,0m. Die mittlere Abweichung zwischen TOP50 DOM und den Höhenpunkten beträgt 1,1m, Standardabweichung 1,8m.

7 Fazit

- Mit dem SRTM-3 Datensatz liegt erstmalig für fast ganz Europa ein konsistentes und kontinuierliches digitales mittelauflösendes Landschaftsmodell (DOM) vor.
- Die Datenbeschaffung der SRTM-3 Daten erfolgt problemlos. Der Datentransfer ist sehr kostengünstig. Die Rohdaten unterliegen keiner restriktiven Lizenzierung, sie können als freie Geodaten bezeichnet werden.
- Stichproben bestätigen den SRTM-3 Daten eine gute, mit Produkten der Landesvermessungsämter vergleichbare Qualität.
- Herkunftsbedingt müssen die SRTM-3 Daten u.U. nachbearbeitet werden. Methodenhinweise wie dies mit kommerzieller Software und Freeware zu bewerkstelligen ist u.a. in CZEGKA & BRAUNE 2004 gegeben.

Die aufgezählten Punkte sprechen dafür, diese neue Datenquelle für geowissenschaftliche Zwecke intensiv zu nutzen. Dies ist auch für wenig erschlossene Gebiete möglich. Anstrengungen wie in BUBENZER & WAGNER (2002) geschildert, um aus GTOPO 30 (USGS Eros Data Centre) Daten Informationen „herauszupressen“, gehören der Vergangenheit an.

Es bleibt zu hoffen dass diese aufgelisteten Fakten Auswirkungen auf die Geodatenpreispolitik der staatlichen Vermessungsämter resp. der landeseigenen Geobasisdatenbetriebe sowie auf die X-Band SRTM-Daten der DLR haben wird.

8. Literatur:

BILL, R. (1999): Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Heidelberg, Wichmann, 2.Aufl. S.108 – 123.

- BUBENZER, O.; WAGNER, A. (2002): Erstellung von mesoskaligen Geländemodellen und Reliefprofilen aus GTOPO30-Daten mit einem Desktop-GIS. – In: GIS 3/02: 27 - 29.
- CZEGKA, W. (2003): ..still und leise. Der USGS gibt das 90m SRTM C-Bandhöhenmodell für Europa frei. Unigis Offline 4/2003 S. 5 .
http://www.unigis.ac.at/club/archiv/UNIGISoffline_4_03.pdf (date accessed 08.01.2004).
- CZEGKA, W. ; BRAUNE , S. (2004): SRTM-90m Höhendaten und ihre Verwendbarkeit in GeoInformationssystemen in Hinblick auf Anwendungsmöglichkeiten in den Geo- und Umweltwissenschaften. Z. Geol.Wiss. in Druck.
- KLUG, H. (2002): Eine Einführung in die Verwendung von ASTER.
www.geo.sbg.ac.at/larg/Astertutorial.pdf (date accessed 08.01.2004).
- KRESSE, W.; FADAIE, K. (2004): ISO Standards for Geographic Information. 322 S, Springer, Heidelberg, Berlin.
- MOLL, A. (2003): Shuttle Radar Topography Mission (SRTM/X-SAR) – ein radarinterferometrisches Höhenmodell und seine Validierung am Beispiel des Bonner Raumes. Diplomarbeit U Bonn <http://www.rsrg.uni-bonn.de/RSRGwww/Deutsch/Diplomarbeiten/Diplomarbeiten.html> (date accessed 05.05.2004).
- STROBL, J. (2002): Digitale Höhenmodelle – Sensoren Qualität und Anwendung. Tutorial.
http://www.unigis.ac.at/club/u2/2003/praesentation/DEM_Tutorial.htm (date accessed 15.01.2004).
- U.S. Geological Survey, EROS Data Center (2002): GTOPO30
<http://edcaac.usgs.gov/gtopo30/gtopo30.html> (Data accessed:[08.01.2004]).

URLs:

<http://edcftp.cr.usgs.gov/pub/data/srtm/Eurasia/>
<ftp://edcsgs9.cr.usgs.gov/pub/data/srtm/>
<http://seamless.usgs.gov>
<http://freegis.org/>
<http://www.mapmart.com/InterNationalDEMS.htm>
 Vermessungsverwaltungen D-A-CH Region:
<http://www.adv-online.de/>
<http://www.swisstopo.ch/>
<http://www.bev.gv.at/>
<http://www.etat.lu/ACT/>

Tabelle 1: Theoretische Verfügbarkeit in % von DEM 1:25000 und topografischen Karten verschiedener Maßstäbe (ohne SRTM Daten). Quellen: Centre National d'Etudes Spatiales; DLR Stand: 2000

Kontinent	Maßstab	DEM 1: 25 000	1: 25.000	1: 50.000	1: 100.000	1: 200.000
Afrika		0	2,9	41,1	21,7	89,1
Asien		2,5	15,2	84	66,4	100
Australien		18,1	18,3	24,3	54,4	100
Europa		37,2	86,9	96,2	87,5	90,9
Nord Amerika		23,9	45,1	77,7	37,7	99,2
Süd Amerika		1,8	7	33	57,9	84,4

Tabelle 2: Weltweit verbreitete DOM

DGM	Raster	Auflösung	Abdeckung	Preis
DETD 0	30" / 1000m	vert. 10m- 250m	global	kostenfrei
GTOPO 30	30" / 1000 m	vert 30m at 90%	global	kostenfrei
SRTM-3	3" / 90 m		ca. 80% 60°N/ 54°S	kostenfrei
SRTM-1	1" / 30 m		ca. 80% 60°N/ 54°S	Auflage
SRTM-Xband	1" / 30 m	vert. >15m; horiz. <6m	ca 35% 60°N/54°S	400€*Füllgrad

Tabelle 3: Quellen für spektrale Fernerkundungsdaten zur Generation von mittelauflösenden Oberflächenmodellen

Satellit	Betreiber	Art der Stereoszene	Bodenaufslg [m]	Szenengrösse [km]	Preis pro Szene [€]
Quickbird	Digital Globe	Seitenblick	0,61	11X11	3000
Ikonos	Space Imaging	Seitenblick	1	16,5X16,5	37000
Spot	CNES	Seitenblick	5 /10	60X60	2500 - 5100
ASTER	NASA	Rückblick	15		0- 55

Möglichkeiten der Fernerkundung für den Aufbau eines Alleenkatasters

GÖRRES GRENZDÖRFFER¹

Zusammenfassung: Im Rahmen des Alleenenwicklungsprogramms von Mecklenburg-Vorpommern wird zurzeit ein Alleenkataster aufgebaut, bisher ohne die Nutzung aktueller oder historischer fernerkundlicher Information. Die Untersuchung von aktuellen und historischen Luftbildern ergab, dass diese nur die wichtigen geometrische Basisinformationen, z.B. über den Standort der Bäume liefern können. Aussagen, z.B. zur Vitalität einzelner Bäume verlangen eine stereoskopische Auswertung und eine hohe Bodenauflösung, wie sie die durch das System PFIFF realisiert werden kann. Durch stereoskopische Schrägaufnahmen können darüber hinaus weitere baumbezogene Informationen abgeleitet werden.

1 Einleitung

Alleen sind ein kulturlandschaftliches Markenzeichen von Mecklenburg-Vorpommern, die jeder Autofahrer bzw. Tourist schon genießen konnte. Um einen langfristigen Erhalt der Alleenbestände zu gewährleisten, ist der Schutz der Alleen in § 12 der Landesverfassung von Mecklenburg-Vorpommern verankert. Im Rahmen eines Alleenenwicklungsprogrammes ist die Straßenbauverwaltung dabei ein einzelbaumbezogenes Alleenkataster aufzubauen. Die bisherige Verfahrensweise besteht darin, entlang der Straße jeden Baum terrestrisch zu erfassen und zu bewerten. Ziel der im Beitrag vorgestellten Untersuchung war es, den möglichen Stellenwert fernerkundlicher Daten für die aufzubauenden Alleenkataster der einzelnen Straßenbauämter zu ermitteln. Es ist dabei von vornherein klar, eine örtliche Besichtigung der Bäume im Zusammenhang mit der Verkehrssicherungspflicht wird durch die Luftbildaufnahmen nicht ersetzt werden können. Es galt jedoch herauszufinden, ob und welche der landesweit vorhandenen aktuellen und historischen Datensätze nutzbar sind. Darüber hinaus soll untersucht werden, welche Vorteile und Möglichkeiten sich aus speziell angepassten und hochauflösenden Befliegungen mit dem digitalen System PFIFF des Instituts für Geodäsie und Geoinformatik ergeben.

Im Gegensatz zu einem geschlossenen Wald besteht eine Allee aus einer mehr oder weniger geschlossenen Baumreihe, die von der Seite betrachtet, viele Informationen über das Erscheinungsbild und die Kronenstruktur der einzelnen Bäume ermöglicht. Deshalb sollte zusätzlich die Flexibilität des low-cost Bildflugs genutzt werden, um stereoskopisch auswertbare Schrägaufnahmen zu erstellen. zusätzlich relevante Informationen liefern können.

2 Datengrundlagen

Als Untersuchungsgebiet dient ein ca. 4 km langer Alleenenabschnitt zwischen Kobrow und Laage, auf dem unterschiedliche Alleentypen zu finden sind. Als terrestrische Vergleichsdaten standen Informationen aus dem Baumkataster des Straßenbauamtes Güstrow zur Verfügung,

¹ Dr.-Ing. Görres Grenzdörffer, Institut für Geodäsie und Geoinformatik, Universität Rostock, J.-v.-Liebig Weg 6, 18059 Rostock, email: goerres.grenzdorffer@auf.uni-rostock.de

die als Einzelbaumweise Daten aus der Alleen-Ist-Beschreibung 2002 durch das Institut für Landschaftsplanung und Landschaftsökologie der Universität Rostock in das Informationssystem gekommen sind. Zusätzlich sind im Rahmen einer Diplomarbeit Detailerhebungen zum Alleenbestand, z.B. Baumhöhe, Stamm- und Kronendurchmesser sowie vitalitäts- und baumstatische Informationen erfasst worden, BORETZKY, 2004. Zur Kennzeichnung und Beurteilung von Alleen wird eine Fülle von Informationen benötigt, die in ein Baumkataster der Straßenbauämter einfließen. Ein Teil der benötigten Informationen kann aus Luftbildern erhoben werden:

1. Bestandesform der Allee. Eine Allee muss mindestens 100 lang sein, um einen gesetzlichen Schutzstatus zu genießen. In Abhängigkeit der Anzahl der Bäume bzw. der Verteilung kann z.B. zwischen einer lückigen und einer geschlossenen Allee unterschieden werden.
2. Straßenbegleitende Strukturen und ergänzende Nutzungen
3. Lage des Einzelbaums und Abstände Baum – Fahrbahnrand, Baum – Baum
4. Baumart und Alter des Baums
5. Baumhöhe, Kronenbreite und Kronenfläche
6. Vitalität und Totholzanteil im Kronenbereich

Ein anderer Teil der benötigten Informationen ist vom Luftbild aus gar nicht oder nur sehr schlecht zu erfassen:

1. Baumstatik
2. Unfallschäden

Als vorhandene Datenquellen konnten über das Landesvermessungsamt Mecklenburg-Vorpommern auf eine historische Aufnahme von 1953 (Maßstab ca. 1:23.000), eine CIR-Aufnahmen von 1991 (Maßstab 1:10.000), die im Rahmen der Biotop und Nutzungstypenkartierung aufgenommen wurde und eine SW-Aufnahme der Landesvermessung von 2000 (Maßstab 1:14.000) zurückgegriffen werden. Die Bilder lagen als Papierabzüge vor. Beim Scanvorgang wurde, aufgrund der unterschiedlichen Bildmaßstäbe und –qualität, die Scanauflösung (1.000 – 1.600 dpi) an die jeweiligen Bilder angepasst. Zur der Entzerrung der Aufnahmen lagen nicht für alle Datensätze die notwendigen Kameraprotokolle für die Erstellung eines Orthophotos vor, bzw. es gibt sie gar nicht. Aus diesem Grund sind die beiden SW-Luftbilder aus dem Jahr 2000 zuerst differentiell entzerrt worden. Das Orthophotomosaik aus den beiden Bildern diente dann als Vorlage für eine polynomiale Entzerrung der CIR-Aufnahmen von 1991 und der historischen Aufnahme von 1953. Da das Gelände entlang der Allee Höhenunterschiede von < 10 m aufweist, konnte eine Lagegenauigkeit gegenüber dem Luftbild von 2000 von < 0.5 m für das CIR-Bild sowie < 1 m für das Luftbild von 1953 erreicht werden. Die Bodenauflösung der CIR-Bilder von 1991 und der SW-Bilder wurde auf 25 cm festgelegt, während für die Bodenauflösung der historischen Aufnahme nur 50 cm eingestellt wurden. Auf die Verwendung von stereofähigen Bildpaaren der amtlichen Bilddaten wurde verzichtet, da die Abgabe an den Nutzer in der Regel als Orthophoto gemäß ADV-Standard erfolgt, wie z.B. die mittlerweile landesweit vorliegenden Farborthophotos.

Eine andere Möglichkeit zu Bilddaten zu kommen sind eigene, speziell für diesen Zweck ausgerichtete Befliegungen, die mit dem am Institut für Geodäsie und Geoinformatik entwickelten System PFIFF durchgeführt wurden, zum Systemdesign und praktischen Ergebnissen vgl. GRENZDÖRFFER, 2002 bzw. GRENZDÖRFFER, 2004. Am 6. September 2004 wurde ein Bildflug entlang des Alleeabschnitts durchgeführt. Das Ziel des Fluges war es die Alleebäume in einer Kombination von Schräg- und Senkrechtaufnahmen zu erfassen und zu untersuchen. Deshalb wurde ein zentraler Flugstreifen senkrecht über der Allee gewählt. Aus einer Höhe von ca. 500 m aufgenommen lag die Bodenauflösung der digitalen Aufnahmen bei etwa 12 cm.

Als GPS-Referenzstation diente ein am Flugplatz aufgebaute Empfänger, der ca. 30 km vom Untersuchungsgebiet entfernt lag. Bei der GPS-Prozessierung konnten die Phasenmehrdeutigkeiten problemlos gelöst werden. Zur Bestimmung der genauen Aufnahmeposition muss die Auslöseverzögerung von 71 ms zwischen dem Auslöseimpuls und der tatsächlichen Aufnahme berücksichtigt werden. Dazu wurde für das Projektionszentrum die registrierte Auslöseverzögerung durch eine lineare Interpolation zwischen den mit 1 Hz aufgezeichneten GPS-Positionen interpoliert. Der Vektor Antenne-Kamera besteht nur aus einem Offset und kann als konstant angenommen werden, da die GPS-Antenne auf dem Dach des Flugzeugs direkt über der Kamera positioniert ist.

Zuerst wurde der nadirblickende Streifen trianguliert. Da zur Orientierung einer Streifentriangulation die GPS-Positionen der Projektionszentren nicht ausreichen, wurden 18 natürliche Passpunkte nach dem Bildflug mit einem geodätischen GPS-Empfänger entlang der Allee aufgenommen. Tab. 1 zeigt die Residuen an den 18 Passpunkten der 34 Senkrechtaufnahmen. Die Passpunkte wurden mit einem σ von 4 cm in X, Y, Z in die AT eingeführt.

Tab 1: Residuen [m] an 18 Kontrollpunkten für die AT des Blocks Laage

	X	Y	Z
Std.	0.07	0.06	0.03
Max.	0.11	0.17	0.07
Min.	-0.13	-0.13	-0.06

2.1. Schrägaufnahmen mit PFIFF

Luftbildschrägaufnahmen werden üblicherweise zu Visualisierungszwecke und weniger mit dem Anspruch einer photogrammetrischen Auswertung aufgenommen. Eine Ausnahme bildet der militärische Bereich, in dem Schrägaufnahmen für Aufklärungszwecke zum Standardrepertoire gehören, z.B. WELZER, 1985.

Bei der Flugplanung von Schrägaufnahmen sind mehrere Besonderheiten zu berücksichtigen. Der Bildmaßstab ist nicht einheitlich, bzw. er nimmt mit zunehmender Entfernung zum Flugzeug zu, siehe Abb. 1. Bei der Flugplanung ist die Flughöhe und der Blickwinkel α_y quer zur Flugrichtung festzulegen. Bei einem Objektiv mit einem Öffnungswinkel β_y ergibt sich dann die minimale d_{min} und die maximale Entfernung d_{max} des Bildes zum Flugzeug, sowie der Bildmaßstab bzw. bei digitalen Bildern die Bodenauflösung.

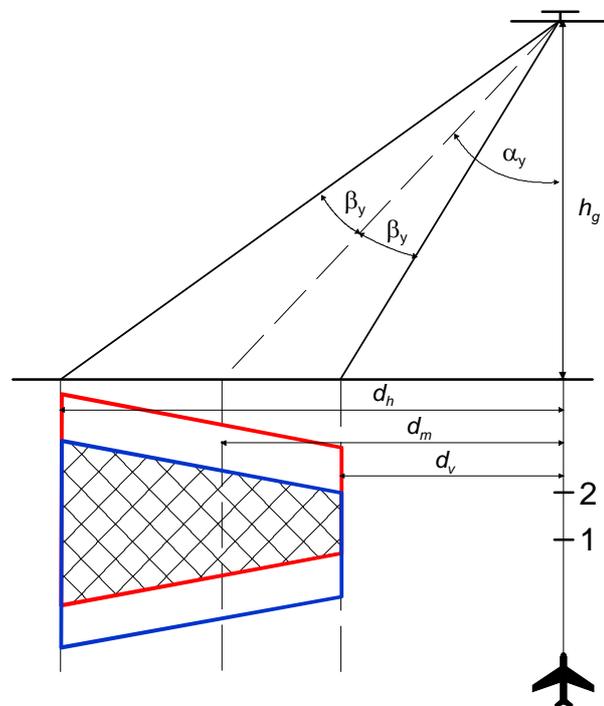


Abb. 1: Schrägaufnahmen

Der minimale, mittlere und maximale Bildmaßstab berechnet sich:

$$m_{b_{\min}} = \frac{h_g \cos \beta_y}{f \cos(\alpha_y - \beta_y)} \quad m_{b_{\text{mittl}}} = \frac{h_g}{f \cos \alpha_y} \quad m_{b_{\max}} = \frac{h_g \cos \beta_y}{f \cos(\alpha_y + \beta_y)}$$

Die Entfernung des Bildvorder- und -hintergrundes zum Flugzeug beruht auf folgender Beziehung:

$$D_{\min} = h_g \tan(\alpha_y - \beta_y) \quad D_{\text{mittl.}} = D_{\max} - D_{\min} \quad D_{\max} = h_g \tan(\alpha_y + \beta_y)$$

Für die Schrägaufnahmen wurde die Kamera während des Bildfluges vom 6.9.2003 um 90° gedreht und bei einer Flughöhe von ca. 450 m von Hand aus dem Fenster gehalten. Bei einem kleinen Sportflugzeug wie der Cessna 172 werden die Räder während des Flugs nicht eingeklappt. Um Bilder der Räder bei den Schrägaufnahmen zu vermeiden, musste von den geplanten 45°-Schrägaufnahmen abgewichen werden. Anstelle dessen betrug der Aufnahmewinkel 60°. Um eine links- und rechtsseitige Perspektive der Alleebäume zu erhalten sind zwei weitere Steifen mit Schrägaufnahmen geflogen worden, Abb. 2. Für photogrammetrisch und stereoskopisch auswertbare Bilder mit einer Längsüberlappung von 60 %, musste die automatische Auslösung durch den Navigationsrechner entsprechend angepasst werden. Grundsätzlich gelten für Stereoschrägaufnahmen dieselben Aufnahmeregeln wie für Stereosenkrechtaufnahmen, d.h. es die Objekte müssen aus einer Ebene heraus unter verschiedenen Blickwinkeln aufgenommen werden.

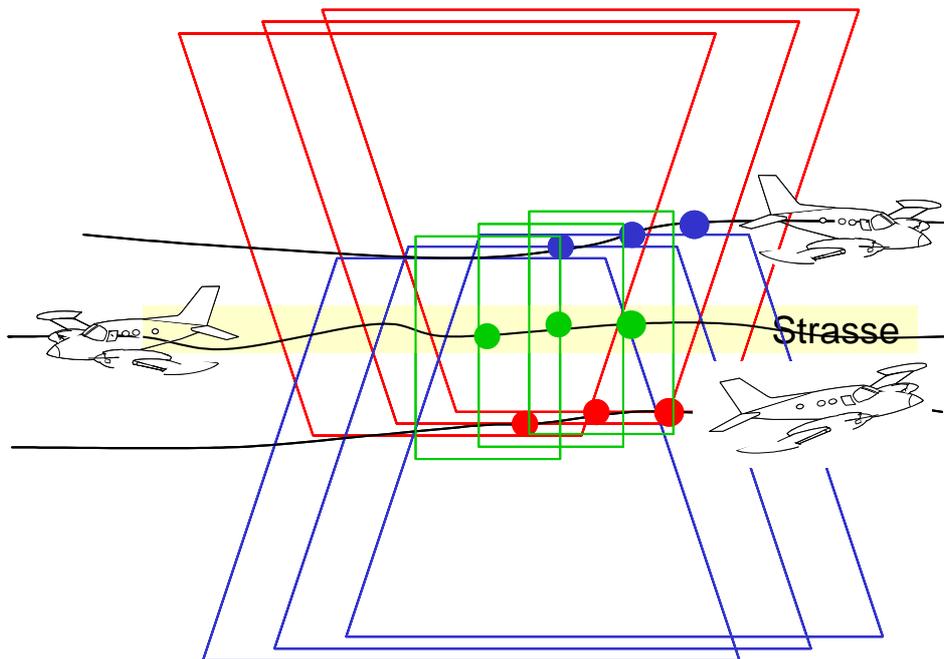


Abb. 2: Flugkonfiguration für eine kombinierte Schräg- und Senkrechtaufnahme eines Alleenabschnitts

Die so gewonnenen Bilder weisen neben der sehr unterschiedlichen Geometrie auch radiometrisch sehr große Unterschiede auf, die auf die bidirektionalen Reflexionseigenschaften der Eroberfläche zurückzuführen sind, wie das Bildbeispiel in Abb. 3 verdeutlicht.

Die Georeferenzierung der Schrägaufnahmen war ungleich aufwändiger, da Verknüpfungspunkte benachbarter Aufnahmen nicht automatisch gefunden wurden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die notwendigen Startwinkel in ω und φ der handausgelösten Schrägaufnahmen unbekannt waren. Nach einer manuellen Bestimmung der minimalen Anzahl von Ver-

knüpfungspunkten einer Auswahl von Bildern, konnte eine vorläufige Triangulation durchgeführt werden, die dann die notwendigen Startwerte in ω und φ lieferte. Danach gestaltete sich die automatische Verknüpfungspunktsuche bei der Mehrzahl der Aufnahmen unproblematisch. Allerdings sind die Startwerte bei einigen Aufnahmen durch die Flugzeugbewegungen

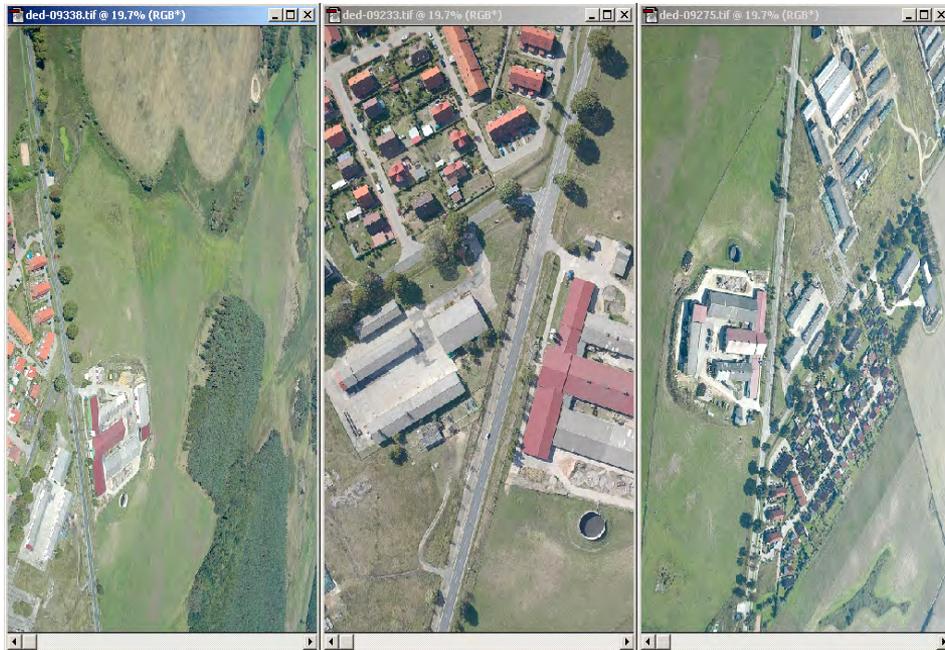


Abb. 3: Beispiel nadir- und schrägblickender Luftbildaufnahmen

und die handausgelösten Aufnahmen nicht ausreichend gewesen, so dass hier erneut manuell nachgearbeitet werden musste. Aufgrund der Maßstabsunterschiede innerhalb der Schrägaufnahmen gestaltete sich die genaue Bestimmung der Passpunkte schwierig. Die Bilder sind entsprechend der mittleren Bodenauflösung mit 25 cm orthorektifiziert worden bei einer durchschnittlichen Genauigkeit von 0.6 m. Leider konnten die Schrägaufnahmen aufgrund eines Softwarebugs der verwendeten ERDAS Stereoanalyst 1.4 nicht in Gänze stereoskopisch ausgewertet werden.

2.2. Direkte Georeferenzierung



Um die angesprochenen Probleme bei der Aerotriangulation von Schrägaufnahmen zu überwinden wurde am 7.4.2004 wurde ein erster Testflug mit einem GPS/INS mit dem Ziel einer direkten Georeferenzierung durchgeführt. Die inertielle Messeinheit (IMU) eines Applanix 410 des DLR, Institut für Verkehrswesen, Berlin-Adlershof – ein Litton LN 200 wurde auf die Kamera montiert, siehe Abb. 4. Aufgrund der kleinen Abmaße und des geringen Gewichts der IMU, war die Kamera immer noch handlich und konnte problemlos für Senkrecht- und Schrägaufnahmen eingesetzt werden. Aufgrund noch nicht restlos geklärter Winkeldifferenzen zwischen dem GPS/INS und der Aerotriangulation konnten die GPS/INS-Werte bis dato nur erfolgreich als Startwerte für eine Aerotriangulation von Senkrecht- als auch Schrägaufnahmen genutzt werden.

3 Aussagemöglichkeiten historischer und aktueller Luftbilder für die Alleenbeschreibung

Die vielfältigen fernerkundlichen Erfahrungen im forstwirtschaftlichen Bereich sind für die Alleenthematik nicht 1:1 umsetzbar, denn bei einer Allee stehen die Einzelbäume im Vordergrund und nicht der Bestand. Die Aussagemöglichkeiten der verschiedenen untersuchten Luftbilder im Hinblick auf die Alleenproblematik waren recht unterschiedlich, BORETSKY, 2004.

Das historische Luftbild von 1953 lieferte die wichtige Information über den Standort der einzelnen Bäume bzw. Baumgruppen, aus denen die Bestandesform der Allee zum damaligen Zeitpunkt ermittelt werden konnte. Aussagen zu weiteren Parametern, wie z.B. dem Alter der Bäume oder die Kronenfläche sind aufgrund der schlechten Bildqualität bzw. der fehlenden stereoskopischen Auswertemöglichkeit nicht möglich gewesen. Während aus dem Luftbild von 1953 nur Strukturen interpretierbar waren, so sind in der CIR-Aufnahme vom Juli 1991 bereits Unterschiede in der Vitalität sichtbar und die Ermittlung der Kronenfläche ist möglich. Die Ansprache der Baumarten war aufgrund der unzureichenden Bildqualität nicht möglich. Der Aufnahmemastab des SW-Luftbilds von 2000 ist mit dem CIR-Bild von 1991 vergleichbar, so dass ein direkter Vergleich der beiden Aufnahmen möglich ist. Wie bereits bei den zuvor beschriebenen Luftbildern sind auch hier die Alleenstruktur und der Abstand zueinander gut zu erkennen.

Die aktuellen digitalen Aufnahmen lieferten die höchste Bildqualität und waren mit den zeitnah erhobenen Vergleichsdaten kompatibel. Die Senkrechtaufnahmen wurden stereophotogrammetrisch mit der Software Erdas StereoAnalyst 1.4 ausgewertet. Bei der Auswertung wurden neben einer visuellen Ansprache der Bäume auch die Baumhöhe und die Kronenfläche gemessen. Der Vergleich mit den terrestrisch über ein Laserdistanzmesser gemessenen Baumhöhen zeigte, dass die Genauigkeit der Höhenmessung stark von der Baumart abhängig ist. Während sich die Baumkrone, z.B. beim Bergahorn konisch nach oben verjüngt zeigt sich die Krone z.B. eine Flatterulme oftmals sehr unregelmäßige, fast transparente Struktur. Die mittleren Abweichungen betragen 1.31 m bzw. 4.10 m. Die hohe Abweichung ist teilweise auch auf eine unzureichende Erfahrung bei der stereoskopischen Messung zurückzuführen. Die Höhe der Bäume lässt sich prinzipiell auch automatisch durch Stereokorrelation aus den Luftbildern berechnen. Allerdings sind die Ergebnisse, insbesondere bei lichten bzw. unregelmäßigen Kronen z.B. Flatterulme sehr unzuverlässig. Da außerdem der höchste Punkt nicht unbedingt getroffen wird, liefert die manuelle stereoskopische Messung zuverlässigere Ergebnisse. Das Alter der Alleebäume lässt sich im Gegensatz zu einem geschlossenen Forst gar nicht bzw. nur sehr grob bestimmen, da die Kronenfläche individuell variiert und keine Vergleichsdaten aus der Literatur zur Verfügung stehen.

Da der Baumdurchmesser bei belaubten Bäumen im Gegensatz zur Kronenfläche von oben nicht ermittelbar ist, kann über eine Korrelation mit terrestrischen Vergleichsdaten eine Beziehung ermittelt werden. In der in Abb. 5 dargestellten Korrelation sind nur Einzelbäume ab einer Kronenfläche von 15 m² eingeflossen, da die Kronenfläche bei Jungbäumen nur mit einem großen Fehler zu ermitteln ist. Wie zu erwarten war, nimmt die Stammdurchmesser mit der Kronenfläche zu. Interessant ist die lineare Baumartenübergreifende Beziehung.

Die Baumartenerkennung erfordert ein geübtes Auge und ist vor allem bei Alleen mit einem großen Spektrum an vorkommenden Baumarten nicht trivial. Zur Bestimmung der Baumvitalität wird die CIR-Abbildung bevorzugt, z.B. HILDEBRANDT, 1996. Mit RGB-Aufnahmen können allerdings auch vergleichbare Ergebnisse erzielt werden, jedoch nur bei einer sehr hohen Bodenauflösung, die eine direkte Ansprache von Verzweigungsstruktur, Totholzanteil,

Blattvolumen und Vergilbung zulassen. Die Bestimmung der Baumvitalität erfolgte nach dem Bewertungsschema von ROLOFF, 2001. Ein Vergleich mit der terrestrischen Aufnahme zeigt, dass die Vitalitätsansprache trotz der unterschiedlichen Perspektive nur um maximal eine halbe Stufe differieren, BORETSKY, 2004.

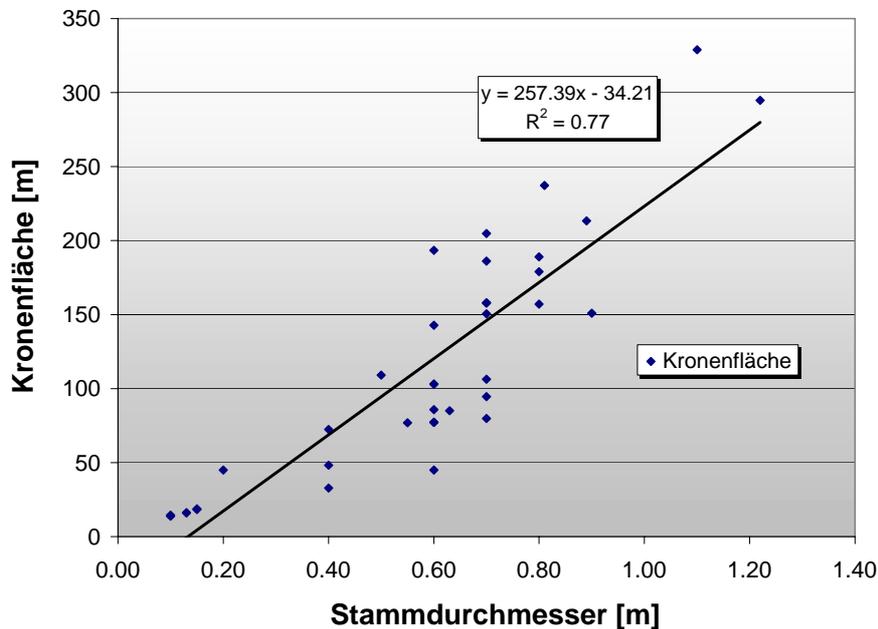


Abb. 5: Verhältnis zwischen Kronenfläche und Stammdurchmesser (n = 37)

Die orthorektifizierten Schrägaufnahmen sowie die teilweise stereoskopisch auswertbaren Bildpaare ergänzen die Senkrechtaufnahmen insbesondere bei einer dichten Baumreihe mit einem geschlossenen Kronendach, sowie bei der Bewertung der Vitalität und der Bestimmung der Entfernung zwischen Fahrbahnrand und Baum.

4 Zusammenfassung

Die vorhandenen Luftbilder bzw. Orthophotos der Landesvermessung und anderer Dienststellen erlauben es, aufgrund der geringen Bodenauflösung und der monoskopischen Betrachtungsweise, nur relativ wenige, wenn auch bedeutsame geometrische Informationen für ein Alleenkataster zu extrahieren. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass der Aufnahmezeitpunkt der vorhandenen Bilder nicht immer optimal war. Nichts desto trotz können diese Aufnahmen beim Aufbau des Alleenkatasters sei es bei der Unterstützung der mobilen Datenerfassung als auch zur Datenkontrolle und Validierung helfen bzw. das Alleenentwicklungsprogramm unterstützen und sollten zukünftig mit genutzt werden.

Im Gegensatz dazu konnte mit den hochauflösenden digitalen Daten des Systems PFIFF eine Vielzahl von relevanten Informationen ermittelt werden. Die Erweiterung der klassischen Senkrechtaufnahme, um Schrägaufnahmen bietet neue interessante Anwendungsmöglichkeiten, die noch nicht vollständig ermittelt werden konnten. Aufgrund der hohen Bodenauflösung ist der Straßenbelag, die Fahrbahnmarkierungen und viele weitere relevante Informationen für die Straßenunterhaltung auf den Luftbildern zu sehen. Da die Luftbilder auch für zukünftige Planungen von Straßen und straßenbegleitenden Maßnahmen, wie z.B. Geh- und Fahrradwegen genutzt werden könne, sollten die neuen Möglichkeiten der digitalen Photogrammetrie nicht nur beim Bau von Autobahnen, sondern auch für untergeordnete Straßen in Betracht gezogen werden. Da der Geokodierungsaufwand durch die notwendigen Pass-

punkte sehr hoch ist, sowohl bei einer Streifentriangulation als auch bei den Schrägaufnahmen, ist für zukünftige Projekte unbedingt ein integriertes GPS/INS zu nutzen. Ein erster Test ist sehr viel versprechend. Für größere und kurvige Alleenabschnitte ist ein Flugzeug nur bedingt geeignet. Hier ist Hubschrauber wesentlich effektiver.

5 Literatur

BORETZKY, M. (2004): Möglichkeiten der Nutzung von Luftbildern für die Kennzeichnung und Beurteilung von Alleen.- Diplomarbeit, Universität Rostock, unveröff.

GRENZDÖRFFER, G. (2002): Konzeption, Entwicklung und Erprobung eines digitalen integrierten flugzeuggetragenen Fernerkundungssystems für Precision Farming (PFIFF).- DGK Reihe C Nr. 552: 140 S.

GRENZDÖRFFER, G. (2004): Das digitale flugzeuggetragene low-cost Fernerkundungssystem PFIFF.- PFG 3/2004, im Druck

HILDEBRANDT, G. (1996): Fernerkundung und Luftbildmessung für Forstwirtschaft, Landespflege und Vegetationskartierung.- 676 S. Wichmann Verlag.

ROLOFF, A. (2001): Baumkronen – Verständnis und praktische Bedeutung eines komplexen Naturphänomens.- Eugen Ulmer Verlag.

WELZER, W. (1985) : Luftbilder im Militärwesen.- 232 S. Militärverlag der Deutschen Demokratischen Republik.

Flächenwirkung des deutschen Autobahnnetzes – Konzept und erste Ergebnisse einer GIS-gestützten Analyse

GOTTHARD MEINEL¹, SASCHA REICHERT²

Zusammenfassung: Für die Raumentwicklung ist die Verkehrsinfrastruktur von grundlegender Bedeutung. In der Planung von Autobahntrassen werden neben verkehrlichen Aspekten (Fahrzeitreduzierung, Verkehrsentlastung etc.) auch wirtschaftliche (Beschäftigung durch Bau und Betrieb) und ökologische Aspekte (Lärm, Schadstoffbelastung, Versiegelung, Trennwirkung) berücksichtigt. Keine nähere Untersuchung fanden bisher die durch Autobahnen und ihren Anschlussstellen (AS) und Zubringern induzierten Standortentwicklungen von Handel, Gewerbe, Industrie, Wohnen und Erholung mit den einhergehenden Flächennutzungsänderungen. Darum wird das Konzept einer ex-post-Analyse der Siedlungsflächenentwicklung infolge neuer Autobahntrassen vorgestellt, welches sich auf die Analyse von Luft- und Satellitenbilddaten stützt. Zuvor werden die ersten Ergebnisse einer GIS-Analyse der Entwicklung des deutschen Autobahnnetzes, der daraus resultierenden Erreichbarkeitsveränderungen und das spezielle Flächennutzungsprofil im Umkreis von Autobahn-Anschlussstellen vorgestellt.

1 Problemstellung

Eine leistungsfähige Verkehrsinfrastruktur ist grundlegende Voraussetzung für eine moderne Volkswirtschaft. In der Planung neuer Verkehrs- und insbesondere Autobahntrassen spielen natürlich in erster Linie die verkehrlichen Aspekte wie Fahr- bzw. Reisezeitreduzierungen sowie Verkehrsentlastungen von Städten und Gemeinden eine Rolle. Darüber hinaus werden im Bundesverkehrswegeplan (BVWP) auch die wirtschaftlichen Effekte neuer Autobahnen (Beschäftigung durch Bau und Betrieb) sowie Umweltwirkungen (Lärm, Schadstoffbelastung, Schwingungen, Versiegelung, Trennwirkung) in der konkreten Trassenplanung berücksichtigt. Wenig Beachtung fanden bisher die an Autobahn-Anschlussstellen (AS) und -zubringern induzierten Standortentwicklungen von Handel, Gewerbe, Industrie, Wohnen und Erholung und die damit einhergehenden Flächennutzungsentwicklungen. Die Flächennutzungsstruktur wiederum ist ein Schlüsselfaktor für das sozioökonomische und ökologische Leistungsvermögen und damit der Lebensqualität des Menschen.

Schwerpunkt bisheriger Forschungsarbeiten ist allein die ökonomische Wirkung von Verkehrsinfrastrukturen, untersucht an ausgewählten Teilmärkten (z. B. Wohnungsmarkt). Ein deutliches Forschungsdefizit besteht bezüglich des Zusammenhangs zwischen Verkehrsinfrastruktur, Standortentscheidung und resultierender Flächennutzungsstruktur. Die wenigen empirischen Untersuchungen dazu beruhen meist auf einem sehr hohen räumlichen Aggregationsniveau. Auch standen bisher vorwiegend ex-ante-Untersuchungen im Vordergrund. Retrospektive Wirkungsanalysen sind selten, obwohl sie in der Entwicklung und Qualifizierung von Modellen grundlegende Bedeutung haben. Den wenigen Studien, die den Zusammenhang zwischen Verkehrsinfrastruktur und Raumentwicklung genauer betrachten, fehlt der Bezug auf die Flächenentwicklung an den Verkehrskorridoren selbst. Bei einigen retrospektiven Untersuchungen waren die Beobachtungszeitpunkte nach Verkehrswegeeröffnung zu

¹ Dr. Gotthard Meinel, Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V., Weberplatz 1, 01217 Dresden, E-Mail: G.Meinel@ioer.de

² Cand. Geogr. Sascha Reichert, Institut für Geographie, TU Dresden, Mommsenstr. 13, 01069 Dresden, E-Mail: Saschi-Reichert@gmx.de

kurz gewählt und bildeten damit die Raumwirkung nur unvollständig ab (z. B. Ringautobahnstudie Amsterdam 2 Jahre nach Eröffnung (BRUINSMA, 1993), Stockholm-Studie 5 Jahre nach Eröffnung (ANDERSTIG, 1991)).

Derzeit ist die Einschätzung der Flächenentwicklung infolge verkehrsinfrastruktureller Erweiterungen nicht Gegenstand der Planungsverfahren, obwohl diese Wirkung augenfällig und im Sinne der Wirtschaftsförderung häufig auch gewollt ist. In keinem bekannten Fall wurde die Raumwirkung in Form der Flächennutzungsänderung in Deutschland retrospektiv untersucht. Diese Untersuchungen sind aber auf Basis von ex-post-Analysen unter Nutzung der Geoinformatik sinnvoll und möglich.

2 Untersuchungsziel

In dem Beitrag wird das Konzept dieser ex-post-Analyse der Siedlungsflächenentwicklung im Zusammenhang mit dem Autobahnbau vorgestellt, welches sich auf historische Satelliten- und Luftbilddaten zur Bestimmung der Flächennutzungsentwicklung stützt. Anhand von Fallbeispielen realisierter Autobahntrassen in Deutschland soll die Raumwirkung von Autobahnen auf lokaler und regionaler Ebene exemplarisch, retrospektiv untersucht werden. Dazu wird nach der Erhebung der Flächennutzungsmuster innerhalb von Distanzzonen um Autobahnen, Autobahn-Anschlussstellen und -zubringern die Flächennutzung in Zusammenhang mit Kenngrößen der Wirtschafts-, Bevölkerungs- und Umweltentwicklung gesetzt und für definierte Zeitabschnitte einer GIS-gestützten Raumanalyse unterzogen.

Nach vergleichender Bewertung der Entwicklung der gewählten Fallbeispiele steht als Ziel die Erarbeitung von Grundlagenwissen zur Thematik Raumwirkung von Autobahntrassen, welches auch für die Prognose der Flächenentwicklung im Umfeld geplanter Trassen genutzt werden kann.

Die praktische Relevanz dieser Untersuchungen ist bei einer Planung von 1 730 km Autobahn in Deutschland bis 2015 (Bundesverkehrswegeplan 2003) und beim Aufbau des Trans-europäischen Netzes für Verkehrsinfrastruktur TEN (u. a. Europäische Raumordnungsministerkonferenz 2000), welches auch sehr umfangreiche Autobahnbaumaßnahmen in Osteuropa vorsieht, in hohem Maße gegeben. Die Untersuchungsergebnisse könnten eine Raumwirkungsprognose hinsichtlich der zu erwartenden Flächennutzungsentwicklung ermöglichen.

Vorgestellt werden hier die ersten Ergebnisse einer deutschlandweiten GIS-Analyse der Autobahnentwicklung im Zusammenhang mit der Erreichbarkeit und der spezifischen Flächennutzung um Autobahn-AS.

3 Aufbau des GIS „Entwicklung des Autobahnnetzes Deutschlands“

Das Geoinformationssystem „Entwicklung des Autobahnnetzes Deutschlands“ ist die Grundlage für die analytischen Arbeiten zur Entwicklung des Autobahnnetzes in Deutschland mit den daraus induzierten Erreichbarkeitsverbesserungen sowie später zu analysierenden Effekten bezüglich Flächen-, Bevölkerungs- und Arbeitsmarktentwicklung einschließlich auch der gezielten Auswahl von repräsentativen Fallbeispielen für detailliertes Flächenmonitoring. Es basiert auf der Grundlage der Geometrien der Autobahnen des „Straßennetzes für die Bundesrepublik Deutschland“ von infas GEOdaten GmbH, Bonn. Dieses hat einen Erhebungsstand von Ende 1998 und wurde in einem Maßstab 1 : 50 000, in Städten teilweise auch

1 : 10 000 digitalisiert. Zu diesem Datenbestand wurden alle Autobahnneubaustrecken bis einschließlich dem Jahre 2000 ergänzt. Weiterhin wurden die über 2 000 Autobahn-AS auf Grundlage der Autobahngeometrien und dem Internetkartendienst www.map24.de erfasst. Die in dem Datenbestand teilweise sehr kleinteilig digitalisierten Autobahnabschnitte wurden anschließend jeweils zwischen den Autobahnknotenpunkten zusammengefasst und in einem zusätzlichen Attributfeld die Freigabe des jeweiligen Autobahnabschnittes eingetragen. Dieses erfolgte auf Grundlage der Domain www.Autobahn-online.de, die wiederum auf die Straßenbauberichte zurückgreift, die seit 1971 jährlich dem Bundestag vorgelegt werden und als Drucksache zur freien Verfügung steht. Da dieser Bestand Lücken aufwies und auch die Freigaben vor 1971 nicht identifizierte, musste er aufwändig anhand historischer Straßenatlanten bzw. -karten vervollständigt werden. Auf eine Differenzierung der Spuranzahl und Ausbauinformationen, die den Straßenbauberichten zu entnehmen ist, wurde verzichtet, da diese Informationen zum einen nicht lückenlos bis 1940 zurückzuverfolgen war und hier auch eine Generalisierung im Sinne der Aufgabenstellung angezeigt erschien.

4 Erste Analyseergebnisse

4.1 Entwicklung des deutschen Autobahnnetzes

Abb. 1 zeigt die Gesamtstreckenentwicklung des deutschen Autobahnnetzes (2002 Gesamtlänge ca. 11 780 km) sowie den jährlichen Zuwachs durch Neubaustrecken. Grundlage war die eindeutige Klassifizierung der Trassen als Autobahnen unabhängig von der Spurzahl und dem Seitenstreifenausbau, Autobahnausbauprojekte wurden also nicht berücksichtigt. Während die Zuwachsstrecken für die alten Bundesländer seit 1971 den Straßenbauberichten entnommen werden konnten, musste für die Ermittlung des Eröffnungsjahres neuer Autobahnabschnitte in den neuen Bundesländern teilweise ein aufwändiger Kartenvergleich Aufschluss bringen, wobei die Zahl der Neubaustrecken in den neuen Bundesländern sehr beschränkt war. Auch für die Autobahnfertigstellungen vor 1945 war das genaue Fertigstellungsjahr nicht immer einfach zu ermitteln.

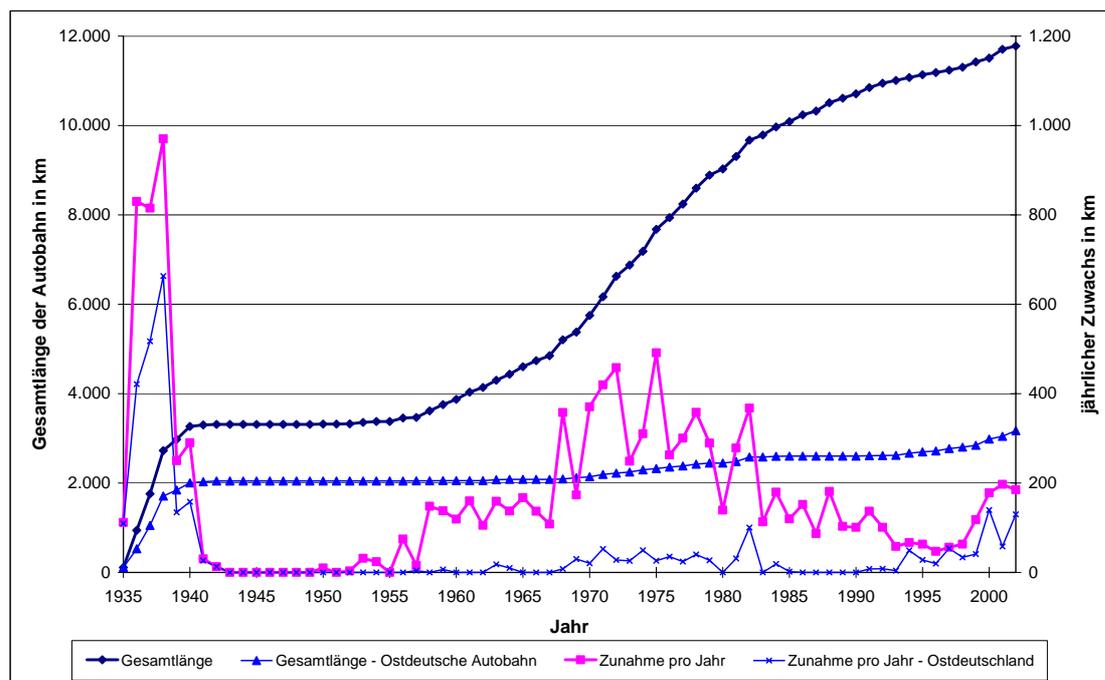


Abb. 1: Längenentwicklung des deutschen Autobahnnetzes (kumulativ und jährliche Zunahme)

Deutlich wird der starke Streckenzuwachs am Ende der 60er bis Mitte der 70er Jahre (Maximum 1975 mit fast 500 km Autobahnneubaustrecke). Dieses ist letztlich auch auf das hohe westdeutsche Wirtschaftswachstum in diesem Zeitraum zurückzuführen (z. B. Wachstum des BIP im Jahr 1969: 8 %!). Auffallend ist weiterhin der geringe Längenzuwachs ostdeutscher Autobahntrassen, der dem geringeren Motorisierungsgrad verbunden mit einem geringen Wirtschaftswachstum geschuldet ist. Erst ab ca. 1994 ist hier mit der Fertigstellung erster Autobahnabschnitte im Rahmen der „Verkehrsprojekte Deutsche Einheit“ eine Zunahme zu verzeichnen.

Die Längenentwicklung des deutschen Autobahnnetzes korreliert sehr stark mit der Zahl von Autobahn-AS, die im Jahr 2000 ca. 2 068 AS betrug.

4.2 Veränderung der Erschließungsqualität

Mit der Trassenentwicklung ging natürlich eine Verbesserung der Erreichbarkeit der nächstgelegenen Autobahn-AS und damit insgesamt eine Reisezeitverkürzung einher. Abb. 2 zeigt die Luftlinienentfernung zur nächstgelegenen Autobahn-AS im Vergleich der Jahre 1950 und 2000 für die Bundesrepublik Deutschland. Diese Abbildung verdeutlicht nicht nur die stark verbesserte Erschließungsqualität, sondern auch eine Verschiebung des Schwerpunktes des Autobahnnetzes vom Osten Deutschlands (radiale Verbindungen ausgehend von der ehemaligen Reichshauptstadt Berlin) hin zum Westen (Ruhrgebiet) im Verlauf der letzten 50 Jahre.

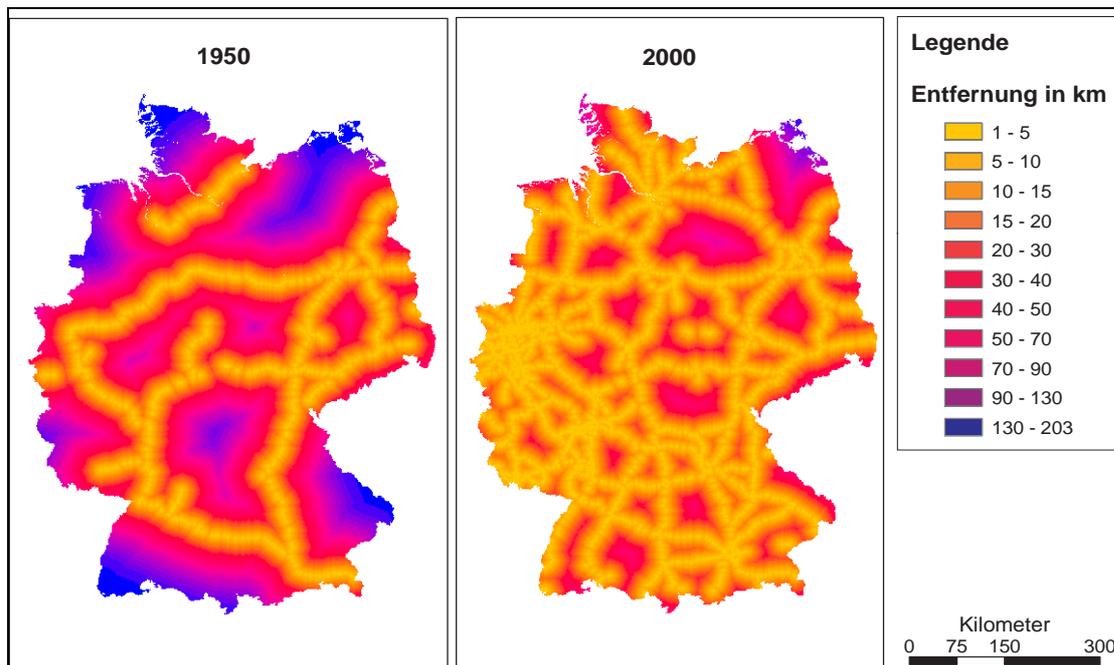


Abb. 2: Erreichbarkeit der Autobahn in Deutschland im Vergleich der Jahre 1950 und 2000 (minimale Luftlinienentfernung zur nächsten Autobahn-AS berechnet auf einer Rasterzellengröße von 1*1 km)

Die Entwicklung der Erreichbarkeit wurde auch auf Basis aller ca. 14 000 Gemeinden, ausgehend von dem Bebauungsmittelpunkt bis zur nächstgelegenen Autobahn-AS (Luftlinie), berechnet (Abb. 3). Die Berechnung erfolgte dabei auf Basis des Gebietsstandes 2000, die durchweg kleinteiligere frühere Gemeindegliederung wurde dabei auf den aktuellen Gebiets-

stand aggregiert und bereinigt. Die mittlere Entfernung vom Bebauungsmittelpunkt der Gemeinden zur nächstgelegenen Autobahn-AS verkürzte sich von 40,3 km im Jahr 1940 auf 14,6 km im Jahr 2000. 46,1 % der Gemeinden haben im Jahr 2000 eine AS in maximal 10 km Luftlinienentfernung und 75,9 % in maximal 20 km Entfernung.

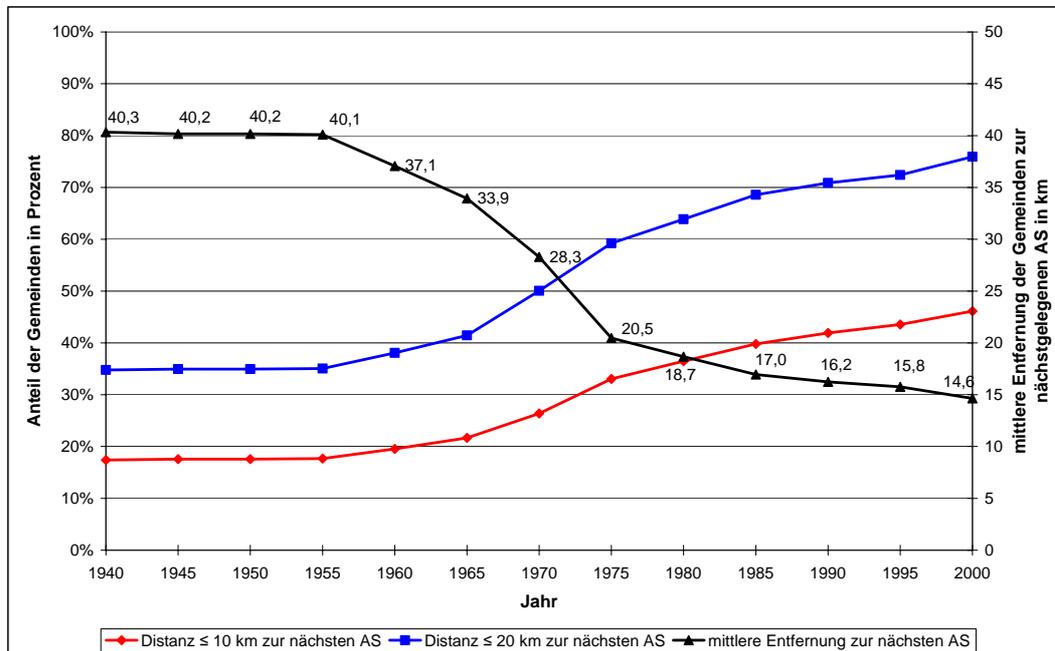


Abb. 3: Entwicklung der Erreichbarkeit der Autobahn (Luftlinienentfernung des Bebauungsmittelpunktes der Gemeinde zur nächstgelegenen Anschlussstelle im Jahr 2000 – mittlere Entfernung und Anteil der Gemeinden mit Distanz ≤ 10 bzw. ≤ 20 km)

4.3 Flächennutzung im Umkreis von Autobahn-Anschlussstellen

Um die Frage nach dem spezifischen Flächennutzungsprofil um die Autobahn-AS zu beantworten, wurde es im Rahmen der deutschlandweiten Analyse erfasst und in Bezug auf die Gesamtdurchschnittswerte Deutschlands bewertet. Grundlage für diese Untersuchung war der digitale „Datensatz zur Bodenbedeckung“ des Statistischen Bundesamtes (1997), der im Rahmen des europäischen Projekts CORINE Land Cover (CLC90) erhoben wurde. Die Flächennutzung bzw. Bodenbedeckung wurde in diesem digitalen raumbezogenen Datensatz frei von administrativen Grenzen in einem Maßstab 1 : 100 000 in 44 Klassen geordnet in 4 Hierarchieebenen zum Erhebungszeitpunkt 1990 erfasst. (Der neue Datensatz CLC2000 wird flächendeckend für Deutschland erst Ende 2004 zur Verfügung stehen!). Bei der Verwendung und Interpretation dieser Daten ist zu beachten, dass durch die festgelegte Mindestgröße der Flächeneinheiten von 25 ha kleinteilige Flächennutzungseinheiten (z. B. kleinere ländliche Siedlungen) statistisch unterrepräsentiert (SIEDENTOP & MEINEL, 2004) werden. Dieser GIS-Datensatz wurde mit Kreispuffern um die 2 068 AS mit den Radien 0,5; 1; 2,5; 5; 7,5 und 10 km verschnitten und damit die spezifische Flächennutzung um die Autobahn-AS bilanziert (Abb. 4). Deutlich wird der wesentlich größere Anteil städtisch geprägter Flächen³ in der Umgebung der Autobahn-Anschlussstellen im Vergleich zum gesamtdeutschen Durchschnitt. Der Anteil städtisch geprägter Flächen ist dabei umso größer, je kleiner der Untersuchungs-

³ Diese Kategorie entspricht der Klasse 1.1 der Flächennutzungs-nomenklatur der Daten zur Bodenbedeckung, die wiederum dem Erhebungsschlüssel des europäischen Datensatzes CLC entspricht. Sie stellt im Wesentlichen Wohnflächen dar.

kreis um die AS ausfällt. Er fällt von 16,7 % in 1 km Entfernung mit zunehmender Größe der Kreispufer auf den Gesamtdurchschnittswert von 5,8 %, was einem ca. dreifach höheren Flächenanteil bebauter und damit versiegelter Fläche im Verhältnis zum Gesamtdurchschnitt Deutschlands entspricht. Stärker gilt das noch für Gewerbe-, Industrie- und Verkehrsflächen, deren Anteil von 5,9 % (500 m Umkreis um AS) auf 0,9 % im Bundesdurchschnitt mit zunehmender Kreispufergröße fällt, was einen 6-fach höheren Flächenanteil dieser Nutzungskategorie um Autobahn-Anschlussstellen darstellt. Auch der Anteil von Deponien und Brachen ist um Autobahn-Anschlussstellen um den Faktor 2 größer als im Gesamtdurchschnitt (0,8 % im Vergleich zu 0,4 %). Diese Zahlen weisen auf die besondere Flächennutzungsstruktur in der Umgebung von Autobahn-Anschlussstellen hin, die durch einen deutlich höheren Anteil überbauter Fläche geprägt ist.

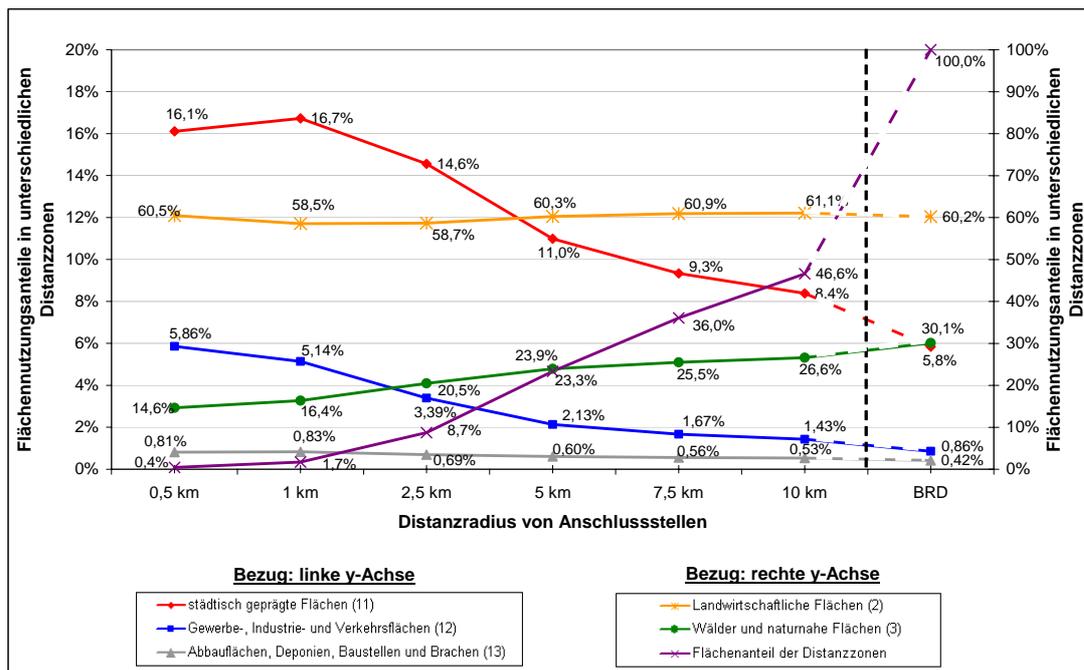


Abb. 4: Flächennutzung in Kreispuffern unterschiedlicher Größe um Autobahn-AS in Deutschland (Grundlage Datensatz der Bodenbedeckung 1990, Stat. Bundesamt)

Damit liegen erste Ergebnisse zum spezifischen Flächennutzungsprofil um Autobahntrassen vor, die ergänzt durch Pufferuntersuchungen um die Autobahntrassen und vertiefende Analysen, die sich bezüglich Maßstab und Flächennutzungskategorisierung auf genauere Flächennutzungsdaten stützen, ergänzt werden sollen. Dabei wird auch der zeitliche Verlauf der Flächennutzungsänderungen im Zuge des Autobahnbaues ermittelt werden (Kapitel 5).

Die Entwicklung des Autobahnnetzes bedingt natürlich neben der Verbesserung der Erschließungsqualität (Abb. 2 und 3) auch letztlich Wirkungen auf Wirtschafts- und Bevölkerungsentwicklung, aber vor allem auch einschneidende Umweltwirkungen. Diese betreffen neben veränderten Flächennutzungsstrukturen (z. B. zunehmende städtische Nutzungen in Autobahnnähe, Abb. 4) auch Lärm, Schadstoffbelastungen, Flächenversiegelung und Zerschneidung einschließlich der Verinselung von Biotopflächen. Zu den Themen Flächenversiegelung und Zerschneidung infolge der Entwicklung des Autobahnnetzes werden in nächster Zeit weitere Untersuchungsergebnisse vorgelegt, die den Rahmen dieser Arbeit gesprengt hätten.

5 Erhebungs- und Analysekonzept für Detailstudien zur Flächenauswirkung neuer Autobahntrassen

Das Erhebungs- und Analysekonzept für Detailstudien zur Flächennutzungsänderung infolge neuer Autobahntrassen ist mehrstufig aufgebaut. In einem ersten Arbeitsschritt wurde ein GIS „Entwicklung des Autobahnnetzes Deutschlands“ aufgebaut (siehe Kapitel 2). Dieses Geoinformationssystem diente als Analysebasis für erste deutschlandweite Untersuchungen zu raumrelevanten Fragen im Zusammenhang mit dem Autobahnnetz (Erreichbarkeit, spezifische Flächennutzung an Autobahntrassen, Bevölkerungs- und Arbeitsplatzdichte). In einem weiteren Arbeitsschritt soll das Autobahn-GIS als Grundlage für die Auswahl von Fallbeispielen für ein Monitoring der Flächenentwicklung infolge neuer Autobahntrassen dienen. Die Fallbeispiele werden aus verschiedenen siedlungsstrukturellen Gebietstypen (Raumkategorien Agglomerationsraum, verstädterter bzw. ländlicher Raum nach BBR-Klassifikation) und verschiedenen Zeitpunkten der Autobahnfreigabe (Beispiele aus den 70er, 80er und 90er Jahren) unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit von Flächennutzungsdaten ausgewählt.

Die Raumanalyse erfolgt in einem zeitlichen und räumlichen Mehrebenenkonzept. So wird die Wirkung in verschiedenen Distanzzonen (0,5; 1; 2,5; 5; 7,5 und 10 km) um die Autobahnzubringer-, -Anschlussstellen und -trassen ermittelt. Neben der Flächennutzung werden auch Wohn-, Bevölkerungs-, Arbeitsplatz- und Wirtschaftsentwicklung auf Gemeindeebene in die Untersuchungen einbezogen und mit der Flächenentwicklung in Beziehung gesetzt.

Der Untersuchungsansatz verfolgt insbesondere die Raumwirkung des Autobahnneubaus in Form von Flächennutzungsänderungen. Damit besteht die Notwendigkeit einer kleinräumigen (1 : 25 000 bis 1 : 50 000) Aufnahme der Flächennutzung zu verschiedenen Zeitpunkten vor und nach Autobahneröffnung (vor dem Bau und 5, 10 und 15 Jahre nach Eröffnung). Um den Datenerhebungsaufwand so gering wie möglich zu halten, wird auf vorhandene georeferenzierte Flächennutzungsdaten sowie die Flächenstatistik „Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung“ auf Gemeindebasis zurückgegriffen. Letztere hat den Vorteil, dass umfassende Zeitreihen vorliegen (in Westdeutschland ab 1979, in Ostdeutschland ab 1993). Da diese Daten allerdings nur bis auf Gemeindeebene verfügbar sind, müssen sie zwingend durch kleinteiligere Daten ergänzt werden. Hierfür sind Flächenerhebungen in den Untersuchungsgebieten auf Basis von Satelliten- und Luftbilddaten notwendig. Hier wird u. a. auf die sehr kostengünstigen CORONA-Bilddaten von amerikanischen Spionagesatelliten (KH1-7, 18 \$/Photo) zurückgegriffen, die die Flächenbedeckungssituation von Mitte der 60er bis Mitte der 70er Jahre zeigt. Auch historische Landsat-TM-Aufnahmen sind preiswert erhältlich und werden genutzt. Bezüglich der aktuellen Flächenbedeckung kann voraussichtlich ab Ende 2004 auf den Datensatz CORINE Land Cover aus dem Jahr 2000 (CLC2000) zurückgegriffen werden. Ergänzt wird die Flächeninformation durch Luftbilddaten und Zahlen der amtlichen Statistik zur Wohn-, Bevölkerungs-, Arbeitsplatz- und Wirtschaftsentwicklung auf Gemeindeebene.

6 Literaturverzeichnis

- ABERLE, G. et. al., 1983: Determinanten der räumlichen Entwicklung, Schriften des Vereins für Socialpolitik, Neue Folge Band 131, Berlin
- ANDERSTIG, M., 1991: IMREL-Modell, Operationelles integriertes Modell für private und gewerbliche Standorte, Stockholm

- BRUINSMA, F., PEPPING, G., RIETVELD, P., 1993: Infrastructure and urban development – the case of the Amsterdam orbital motorway, Amsterdam Vrije Universiteit, Faculteit der Economische Wetenschappen en Econometrie, Heft 19
- Bundesverkehrswegeplan, 2003: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, www.bmvbw.de
- CORINE Land Cover (CLC) – Technical Guide, European Environment Agency, 1997: ETC/LC
- Daten zur Bodenbedeckung für die Bundesrepublik Deutschland, 1997: Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
- FRERICH, J., 1974: Die regionalen Wachstums- und Struktureffekte von Autobahnen in Industrieländern, Duncker & Homboldt, Berlin
- GATHER, M., 1999: Regionale Effekte des Fernstraßenbaus in den neuen Bundesländern, Forschungsprojekt, Fachhochschule Erfurt
- Grundzüge der gesamtwirtschaftlichen Bewertung des Bundesverkehrswegeplanes, 2003: BMVBW, 2002
- GÜLLER, P. et al., 1990: Löst der Verkehr die Stadt auf? Zusammenhänge zwischen Verkehrs- und Siedlungsentwicklung in der Agglomeration Luzern, Forschungsabschlussbericht, Zürich
- JENNI, F., GOTTARDI, G., 1996: Systematische Wirkungsanalysen umweltbezogener verkehrspolitischer Maßnahmen, Schweizerischer Verband der Straßen- und Verkehrsfachleute, FA 1/94
- Leitlinien für eine nachhaltige räumliche Entwicklung auf dem europäischen Kontinent, 2000: Europäische Raumordnungsministerkonferenz (CEMAT), 2000/7
- LICHT, G., SEITZ, H., 1994: The Impact of the Provision of Public Infrastructure Capital on Regional Economic Development in Germany, *Regional Studies*, 29, S. 231-240
- LOWRY, S. I., 1964: A Model of Metropolis, The Rand Corporation, Santa Monica, California, U.S.A.
- LUTTER, H., 1981: Raumwirksamkeit von Fernstraßen. In: Informationen zur Raumentwicklung, Heft 3/4
- PUTMAN, S. H., 1983: Integrated Urban Models: Policy Analysis of Transportation and Land Use, Pion, London
- RIEDER, S., 1998: Autobahnbau als Instrument zur Förderung der regionalen Wirtschaft, Institut für Politikstudien, Luzern
- SEIMETZ, H.-J., 1987: Raumstrukturelle Aspekte des Fernstraßenbaus. Auswirkungen von Autobahnen auf Arbeitsplatzwahl, Wohnortwahl und Einkaufsverhalten privater Haushalte (dargestellt am Autobahnteilstück Bingen-Koblenz der Autobahn A 61), *Mainzer Geographische Studien*, Heft 30
- SEITZ, H., 1993: A Dual Economic Analysis of the Benefits of the Public Road Network, *The Annals of Regional Science*, 27, S. 223-239
- SIEDENTOP, S., MEINEL, G., 2004: CORINE Land Cover 2000 in Nation-wide and Regional Monitoring of Urban Land Use and Land Consumption, CORINE Land Cover Workshop, Berlin, 2004
- STEPHAN, A., 1997: The Impact of Road Infrastructure on Productivity and Growth: Some Preliminary Results for the German Manufacturing Sector, Discussion Paper FS IV 97-47, Wissenschaftszentrum Berlin

Berücksichtigung digitaler Kameras im neuen Normentwurf E DIN 18740-4

CHRISTOPH DÖRSTEL ¹, RALF REULKE ² & REINER SCHWEBEL ³

Zusammenfassung: Digitale Luftbildkameras werden derzeit von verschiedenen Anbietern in den photogrammetrischen Markt eingeführt. Direkt erfasste digitale Bilddaten können dem Nutzer vielfache Vorteile bringen. Das sind etwa die zeitgleiche Erfassung multispektraler Daten, die schnelle Verfügbarkeit, ein erhöhter Dynamikbereich durch 12 anstatt 8 Bit Daten sowie ein gutes Signal-Rauschverhältnis.

Diese Vorteile sind viel versprechend. Aber können die neuen digitalen Kameras mit den Anforderungen aus heutigen Projekten auch standhalten? Wie kann der Auftraggeber oder Auftragnehmer schnell und eindeutig überprüfen ob die geforderten Qualitätskriterien eingehalten sind? Welche Qualitäts- und Abnahmekriterien müssen definiert werden? Wie bewertet man die neuen Aufnahmetechnologien z.B. Zeilensensoren? Die Fragen sind mannigfaltig.

In diesem Beitrag wird das Grundkonzept der neuen, derzeit in der Definitionsphase befindlichen DIN 18740-4 „Anforderungen an digitale Luftbildkameras und digitale Messbilder“ vorgestellt. Hierbei werden das Spannungsfeld von der Einzelflächenkamera über die Multisensorkamera bis hin zum Zeilensensor beleuchtet und die grundlegenden Anforderungen an Kameras und Bilder definiert. Die für ein Bildflugprojekt maßgeblichen Parameter und Qualitätskriterien werden in einer Spezifikation festgelegt und Prüfverfahren zur Verifizierung der Qualitätsanforderungen vorgeschlagen.

Der beschriebene Normentwurf ist Teil der vom DIN-Arbeitsausschuss „Photogrammetrie und Fernerkundung“ erarbeitete Normreihe 18740 „Photogrammetrische Produkte“.

1 Einleitung

Neue Verfahren und Systeme, die sich in der Phase der Entwicklung und Markteinführung befinden, einer Standardisierung zu unterziehen, ist ein nicht ganz unproblematisches Unterfangen: Einerseits sollten die Normvorgaben so allgemein sein, dass sie für die unterschiedlichen und auch zukünftigen Lösungen gültig sind; andererseits soll eine Norm konkrete Angaben machen, die von praktischem Nutzen sind.

Der DIN Arbeitsausschuss „Photogrammetrie und Fernerkundung“ ist sich dieser Problematik bewusst. Um jedoch zu einem frühen Zeitpunkt dem Praktiker die Kriterien zur Entscheidungsfindung für eine Systembeschaffungen und Qualitätsstandards für das Endprodukt Digitales photogrammetrisches Bild geben zu können, wurde das Normprojekt „Anforderungen an das digitale Luftbild“ in Angriff genommen. Es wird notwendig sein, die Norm entsprechend dem jeweiligen Stand der Technik fortzuführen.

2 Normenreihe 18740

Der hier vorgestellte Normentwurf für digitale photogrammetrische Bilder, hergestellt mit digitalen Luftbildkameras, ist der vierte Teil der neuen Normreihe 18740 „Photogrammetrische Produkte“. Ziel der Normreihe ist es, für die wichtigsten photogrammetrischen Kern-

produkte Qualitätsstandards zu erstellen. Als Kernprodukte gelten hier unverarbeitete und verarbeitete bildhafte Informationen, also analoge und digitale Bilder sowie digitale Orthophotos. Die Normreihe konzentriert sich auf messtechnisch verwertbare Luftbilder, da diese den wesentlichen kommerziellen Bereich der praktischen Photogrammetrie ausmachen und umfasst:

- Teil 1 – „Anforderungen an Bildflug und analoge Luftbilder“ (Norm November 2001)
- Teil 2 – „Anforderungen an das gescannte Luftbild“ (Normentwurf Mai 2004)
- Teil 3 – „Anforderungen an das Orthophoto“ (Norm Oktober 2003)
- Teil 4 – „Anforderungen an das digitale Luftbild“ (Normentwurf in Bearbeitung)

Eine Kurzbeschreibung der Normteile 1, 2 und 3 und die zugehörigen Formblätter für die Projektspezifikationen sind im Internet unter www.dgpf.de im Bereich Normungsvorhaben aufgeführt.

Das Konzept der Normreihe enthält:

- grundsätzliche Anforderungen an Verfahren und Produkte
- projektspezifische Parameter und Qualitätskriterien

Es bietet dem Anwender ein umfassendes und flexibles Werkzeug zur Qualitätsplanung und Qualitätssicherung.

Generell gilt, dass Normen in der Regel nicht per Gesetz, sondern auf Grund von Verwaltungsvorschriften oder von Verträgen zwischen Auftraggebern und Auftragnehmern angewendet werden. Dabei können Normen nicht nur als Ganzes, sondern auch Teile davon zur Anwendung kommen. Die Anwendung als Ganzes wird durch die weitgehende Parametrisierung ermöglicht.

3 Stand der Technik

Seit etwa zwei Jahren stehen digitale photogrammetrische Kamerasysteme zur Verfügung, die in der Lage sind, herkömmliche filmbasierte Kameras abzulösen. Damit wird der schon lange vorhandene digitale Auswertansatz auf photogrammetrische Arbeitsstationen mit der digitalen Aufnahme verbunden.

Photogrammetrische Kamera bedeutet hier, dass neben der hohen Auflösung und einer großen Schwadbreite auch eine ausreichende Genauigkeit der Kalibrierung und der Lagemessung gewährleistet ist, um damit den heute üblichen Scanprozess von Filmvorlagen, gewonnen aus Aufnahmen der filmbasierten Luftbildmesskammern, überflüssig zu machen.

Inzwischen kann man davon ausgehen, dass die räumliche Auflösung und die erzielte Genauigkeit digitaler Kamerasysteme vergleichbar mit denen der klassischen Ansätzen ist. Entscheidender Unterschied zu den analogen photobasierten Aufnahmesystemen ist das signifikant bessere Signal zu Rausch Verhältnis (SNR) und die absolute Radiometrie der panchromatischen und multispektralen Kanäle.

Das entscheidende Problem besteht darin, gleichzeitig eine hohe räumliche Auflösung und eine große Schwadbreite (Flugökonomie) zu erzielen. Prinzipiell stehen zwei Sensortechnologien zur Verfügung – die matrixbasierten und die zeilenbasierten Aufnahmesysteme.

Während Matrixsysteme auf eine stabile Geometrie verweisen können, haben Zeilensysteme den Vorteil, mit einem Detektorarray den gesamten Aufnahmebereich zu erfassen. Im Fol-

genden sollen an Beispielen die wesentlichen Kamertechnologien erläutert werden (Abbildung 1).

3.1 Matrixbasierte Systeme

Da keine ausreichend großen flächenhaften Detektorarrays zur Verfügung stehen, muss bei matrixbasierten Systemen ein Bild aus mehreren Detektorflächen zusammengesetzt werden. Das Problem besteht darin, die Detektoren lückenlos aneinander zu fügen. Dafür wurden technologisch zwei Ansätze umgesetzt. Die Digital Mapping Camera (DMC) von ZI-Imaging kippt die einzelnen Sensorflächen zueinander und löst die Bilder zeitsynchron aus (HINZ, 2000, DÖRSTEL, 2003). Der Vorteil ist die reproduzierbare Abbildungsgeometrie, der Nachteil ist, die theoretisch mögliche, jedoch vernachlässigbare Abhängigkeit der Umbildung von der Geländehöhe (ZEITLER, 2002).

Die UltraCam von Vexcel verwendet 9 Flächenarrays auf 4 Fokalebene (LEBERL, 2003). Die entstehenden Lücken auf der zentralen Fokalebene werden dadurch geschlossen, dass entsprechend der Fluggeschwindigkeit die verbleibenden Arrays so ausgelöst werden, dass lediglich ein Projektionszentrum einer virtuellen Fokalebene entsteht. Der Vorteil des einheitlichen Projektionszentrums steht die aufwendige Synchronisation und mögliche Fehler bei der Nachbearbeitung entgegen. Problematisch sind weiterhin die Eigenbewegung des Trägers, sowie der Fall sich bewegender Objekte, die zu verschmierten Abbildungen und Farbsäumen führen.



Abb. 1: ADS40 (Leica),



DMC (ZI-Imaging),



UltraCam (Vexcel)

3.2 Zeilenbasierte Systeme

Als zeilenbasiertes System ist die ADS 40 der Firma Leica realisiert worden (SANDAU, 2000, REULKE, 2003). Der Vorteil ist die große Schwadbreite sowie die Verwendung nur einer Optik für alle Zeilen. Der Nachteil ist die aufwendige Messung der äußeren Orientierung mittels Inertialer Messeinheiten (IMU).

Generell gelten für zeilen- und flächenbasierte digitale Kamerasysteme, dass die Benutzer nicht die originalen Aufnahmeinformationen erhalten. Um aus den Rohbilddaten geeignete Bilder für die photogrammetrischen Weiterverarbeitungsprozesse zu generieren werden die Daten sowohl radiometrisch nachbearbeitet als auch geometrisch umgebildet. Dies erfolgt mit Bildverarbeitungsmethoden in einem so genannten „Post-Processing-Schritt“.

4 Normentwurf 18740-4

Da ein photographischer Film ein anderes Sensitivitätsverhalten als ein CCD hat, können die Anforderungen an gescannte Bilder nicht auf direkt digital erfasste Bildinformation übertragen werden. Des Weiteren kann bei einem Zeilensensor keine Forward Motion Compensation (FMC) realisiert werden. So ergibt sich also mit der Einführung der neuen digitalen Kamertechnologie ein neuer Bedarf in der Normenreihe.

Der Normentwurf zur DIN - 18740-4 „Anforderungen an digitale Luftbildkameras und digitale Messbilder“ ist derzeit in der Definitionsphase und behandelt vier Schwerpunktthemen, die im Weiteren kurz vorgestellt werden:

- Anforderungen an digitale photogrammetrische Kameras
- Anforderungen an Bildflüge mit digitalen Kameras
- Anforderungen an das digitale Luftbild
- Prüfung der digitalen Bilder

Ergänzend dazu werden in einem Anhang die spezifischen Parameter für ein Bildflugprojekt mit digitalen Kameras in Form einer Prüfliste beschrieben. Die Norm wird so gestaltet, dass entsprechend der Anwendung Spielraum für die Festlegung von Qualitätsanforderungen und besonderer Projektparameter gegeben ist.

4.1 Anforderungen an digitale photogrammetrische Kameras

In diesem Teil werden zuerst die grundlegenden Anforderungen an die Kamera und deren Komponenten festgelegt. Das ist etwa die Fähigkeit panchromatische und multispektrale Bilder zeitgleich zu erzeugen sowie Echtfarbenbilder wiedergeben zu können. Da hierzu in allen Systemen mehrere flächen- oder zeilenartige Sensoren eingesetzt werden, müssen diese zeitsynchron ausgelesen werden oder die Zeitabstände zwischen den Auslösungen der verschiedenen Sensoren sehr präzise bekannt sein. Nur so kann garantiert werden, dass die für eine gute Flugdurchführung notwendige Auslösegenauigkeit und GPS Referenz sicher hergestellt werden kann. Im Allgemeinen wird dazu eine Genauigkeit der Auslösezeit von besser ± 0.2 [msec] benötigt.

Des Weiteren werden die radiometrischen Eigenschaften der Sensoren normiert. Im Unterschied zu analogen photographischen Kameras ermöglichen digitale Systeme eine reproduzierbare Messung von Grauwerten, wenn der gemessene Grauwert mit physikalisch relevanten Umgebungsparametern in Verbindung gebracht wird. So wird in der Norm gefordert, dass alle Sensoren radiometrisch kalibriert werden müssen und die multispektralen Kanäle absolut radiometrisch kalibriert sein sollen. Natürlich ist bei dem heutigen Stand der Technik die Forderung nach einem 12 Bit Dynamikbereich realisierbar und durch entsprechende Kalibrierung muss eine hohe Stabilität und ein gutes Signal zu Rausch Verhältnis (SNR) erreicht werden können. Die Kalibrierung muss deshalb mindestens die Dunkelstromkorrektur (DSNU, Dark Signal Non Uniformity) sowie eine Kalibrierung der pixelabhängigen Empfindlichkeit (PRNU, Pixel Response Non Uniformity) enthalten.

Diese Anforderungen werden ergänzt durch Hinweis auf ein entsprechendes Optikdesign, um eine gute Abstimmung zwischen der räumlichen Grenzfrequenz des optischen Systems und

dem Pixelabstand zu erhalten. Anders als dies beim analogem Film üblich ist, können in der digitalenameratechnik je nach verwendetem CCD, Objektive mit geringerer Grenzfrequenz (Auflösungsvermögen) eingesetzt werden. Das Kriterium zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines digitalen Systems ist zwar immer noch die Grenzfrequenz, diese bekommt aber eine andere Bedeutung. So muss im digitalen System, um eine gute Abbildung zu ermöglichen die Grenzfrequenz des optischen Systems auf den Sensor abgestimmt sein. Wurden beim Film Grenzfrequenzen von 100 Linienpaaren pro mm (Einheit, [lp/mm]) gefordert, würde ein digitaler Sensor mit dem gleichen Objektiv ausgerüstet einen Pixelabstand von maximal 5 [µm] benötigen. Für flächenhafte CCD ist dieses Forderung derzeit technisch nicht erfüllbar und auch nicht notwendig, denn es darf weder eine Über- noch eine Unterabtastung entstehen, um Kontrastwechsel oder Abtastfehler zu vermeiden. Deshalb muss das optische System das einfallende Signal in Abhängigkeit vom Pixelabstand des diskretisierenden Elements (CCD) so filtern, dass keine Abtastfehler entstehen. Dieser Effekt wird durch die Punktbildverschmierungsfunktion (PSF) des optischen Systems beschrieben und bedeutet eine Beeinträchtigung der Bildqualität. Eine unnötige Verschlechterung des Signals bewirken Redundanzen in der Abtastung (oversampling).

$$\text{Grenzfrequenz [lp/mm]} \geq \frac{1000}{2 \cdot \text{Pixelabstand [\mu m]}}$$

Formel 1: Bestimmung der optischen Grenzfrequenz

In Formel 1 wird beschrieben, wie der Zusammenhang zwischen Pixelabstand und optischer Grenzfrequenz ist. Der Begriff Pixelabstand für CCD Sensoren wird in Abbildung 2 sowohl für konventionelle CCD Technik oder so genannte „gestaggerte Detektorarrays“ erläutert und gleichzeitig gegenüber dem Begriff der Pixelgröße abgegrenzt.

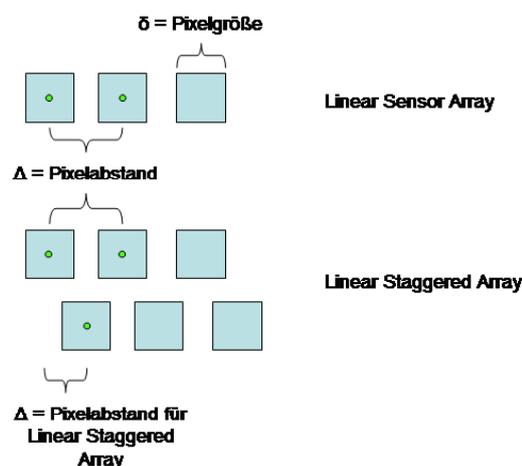


Abb. 2: Lineare und gestaggerte Detektorarrays

Die räumliche Grenzfrequenz ist erreicht, wenn charakteristische Strukturen z.B. das Airforce Pattern oder Siemensstern (siehe Abbildung 3) nicht mehr klar identifiziert werden können.

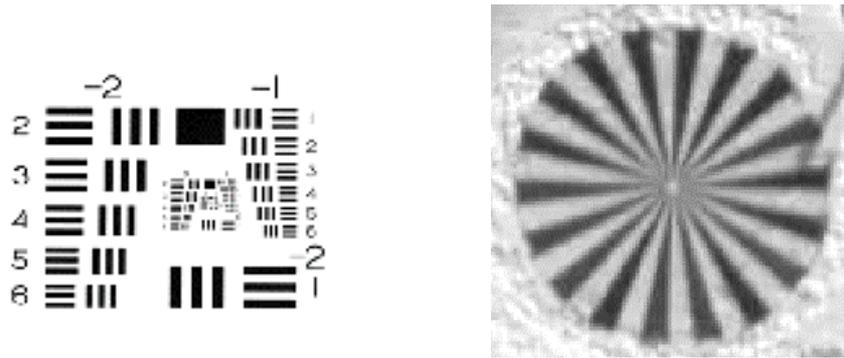


Abb. 3: Strukturen für den Auflösungstest; links - Airforce Pattern, rechts – Siemensstern

Das Auflösungsvermögen eines Sensors kann zum Beispiel aus dem Unschärfekreis eines Siemenssterns (Abbildung 3) nach Formel 2 abgeleitet werden.

$$\delta = 2\pi \cdot r_c / n \quad n \dots \text{Anzahl der s/w - Übergänge}$$

Formel 2: Bestimmung Auflösungsvermögen aus Unschärfekreis

Die Größe r_c ist der Verschmierungsradius, δ ist die räumliche Grenze des Auflösungsvermögens, die der Grenzfrequenz entspricht.

4.2 Anforderungen an Bildflüge mit digitalen Kameras

In diesem Kapitel werden die Anforderungen an den Bildflug beschrieben, die sich teilweise auf die Norm 18740-1 „Anforderungen an Bildflug und analoges Luftbild“ (DIN, 2001) abstützen. Sie ist um Abschnitte wie geometrische und radiometrische Auflösung sowie um die Definition geeigneter Abtastmuster ergänzt, die bei Verwendung digitaler Systeme bestimmend für die Produktqualität sind.

Ebenso wird in dieser Norm der Begriff der Bodenauflösung eingeführt, da die bisherige Angabe einer Bildmaßstabszahl im digitalen Bild an Bedeutung verloren hat. Dieser Umstand ist auch für die durchgängige Beurteilung der Bildqualität sinnvoll, denn die im Orthophoto geforderte Bodenauflösung kann nun für den Bildflug direkt geplant oder entsprechend berücksichtigt werden. Mit dem Begriff Bodenauflösung oder Ground Sampling Distance (GSD) ist im digitalen Bild der „Bodenabdruck“ eines Detektorelementes (Pixel) gemeint.

Ein weiteres neues Kapitel ist der Integrationszeit gewidmet. Die Anpassung der Integrationszeit eines Sensors an die Belichtungsverhältnisse kann einerseits zur Erweiterung des Dynamikbereiches genutzt werden, andererseits bestimmen die Integrationszeit und Blende aber auch die Signalstärke und können zu Verschmierungen führen. Deshalb wird bei flächenhaften Sensoren das Verfahren der Time Delayed Integration (TDI) angewandt, um Verschmierungseffekte zu vermeiden. Bei Zeilensensoren kann das TDI Verfahren nicht angewandt werden. Durch den Umstand, dass eine Zeile in ca. 1-2 msec ausgelesen werden kann wird das teilweise ausgeglichen, und zwar genau bis zu dem Punkt, an dem bei hoher Auflösungsanforderung und daraus resultierender geringer Flughöhe die Zeile nicht mehr schnell genug ausgelesen werden kann, oder das Flugzeug nicht mehr langsamer fliegen kann.

4.3 Anforderungen an das digitale Luftbild

In diesem Kapitel wird das digitale Luftbild als Ergebnis der radiometrischen Korrektur und der geometrischen Umbildung normiert. Ein solches Bild kann direkt der Auswertung oder Weiterverarbeitung in digital photogrammetrischen Auswertesystemen zugeführt werden.

Die neuen Aspekte sind hier zum Beispiel, dass, um eine gute Bildqualität zu gewährleisten, die digitalen Rohdaten vor der Anbringung der radiometrischen Korrekturen lediglich durch verlustfreie Kompressionsverfahren komprimiert werden dürfen.

Eine Definition der notwendigen Metadaten, die mit den Bildern gespeichert werden müssen rundet dieses Kapitel ab.

4.4 Prüfung der digitalen Bilder

In diesem Kapitel werden Prüfverfahren zur Qualitätssicherung beschrieben und die Lieferung und der Lieferumfang so definiert, dass in einer angehängten Spezifikation ein Bildflugprojekt für digitale Luftbilder klar und eindeutig definiert werden kann. In diesem Kapitel wird auch auf die Notwendigkeit der Protokollierung der Sensorkalibrierung eingegangen. Hierzu gibt es zum jetzigen Zeitpunkt noch keine klaren Definitionen. Dennoch sei hier auf die verschiedenen Bemühungen besonders das EuroSDR Projekt zur digitalen Kamerakalibrierung verwiesen (CRAMER, 2004).

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dem vorliegenden Paper wird der Normentwurf für digitale photogrammetrische Luftbildkameras und digitale Luftbilder vorgestellt. Hierbei werden die 4 Hauptkapitel jeweils durch Beschreibung der Besonderheiten der neuen digitalen Luftbildkameras vertieft. Besonders wird auf die erweiterten radiometrischen und veränderten abbildenden Eigenschaften der neuen digitalen Sensoren eingegangen. So wird die Bedeutung der Grenzfrequenz und ein Verfahren zur Messung des Auflösungsvermögen eines digitalen Sensors vorgestellt. Am Beispiel der Integrationszeit wird der Unterschied zwischen Zeilen- und Flächensensor aufgezeigt und die Notwendigkeit einer differenzierten Betrachtungsweise der beiden Technologien aufgezeigt.

„Es ist nichts beständig als die Unbeständigkeit“ sagte Immanuel Kant (1724-1804) und diese Unbeständigkeit meint in unserem Fall den Fortschritt. In diesem Sinne waren sich alle an dem DIN Entwurf beteiligten Mitarbeiter einig, diese neue Norm möglichst schnell, praxisgerecht und zeitnah einführen zu wollen. Um dies erreichen zu können, benötigt der Arbeitskreis Rückmeldungen von den Herstellern und anderen Fachkreisen, die sich mit dem Thema befassen. Erfahrungen aus der Praxis ebenso wie weitergehende wissenschaftliche Aspekte sollen Berücksichtigung in diesem Normvorhaben finden.

6 Literaturverzeichnis

CRAMER, M., 2004: EUROSDR NETWORK ON DIGITAL CAMERA CALIBRATION, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing – Congress 2004 – Istanbul, noch zu veröffentlichen

- DIN, 2001: E DIN 18740-1 Photogrammetrische Produkte – Teil 1 – Anforderungen an Bildflug und analoges Luftbild - Beuth-Verlag, Berlin
- DÖRSTEL, C., JACOBSEN, K., STALLMANN, D., 2003: DMC – Photogrammetric accuracy – Calibration aspects and Generation of synthetic DMC images, Eds. M. Baltasvias / A. Grün, Optical 3D Sensor Workshop, Zürich
- HINZ, A., DÖRSTEL, C., HEIER, H., 2000: Digital Modular Camera: System Concept and Data Processing Workflow”, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B2. pp. 164
- LEBERL, F., GRUBER M., 2003: Economical Large Format Aerial Digital Camera, GIM International, June 2003
- REULKE, R., 2003: Design and Application of High-Resolution Imaging Systems, GIS Geo-Informationssysteme, Vol 3/2003, p. 30-37
- SANDAU, R. BRAUNECKER, B., DRIESCHER, H., ECKARDT, A., HILBERT, S., HUTTON, J., KIRCHOFER, W., LITHOPOULOS, E., REULKE R., WICKI S., 2000: Principles of the LH SYSTEMS ADS40 Airborne Digital Sensor, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B1. Amsterdam 2000, pp.258
- ZEITLER, W., DÖRSTEL, C., JACOBSEN, K., 2002: Geometric calibration of the DMC: Method and Results, Proceedings ASPRS, Com. 1, Denver, USA.

Standardisierung von Geoinformationssystemen aus Sicht der städtischen Planung

¹TOBIA M. LAKES

Zusammenfassung: Ausgehend von einer Analyse des Einsatzes geographischer Informationssysteme in der städtischen Planung werden am Beispiel der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlins Anforderungen an die Standardisierung von GIS erarbeitet. Die aktuelle Situation in der Verwaltung ist geprägt von einer Vielzahl verteilt vorliegender heterogener raumbezogener Daten, Systeme und Anwendungen. Mithilfe einer Differenzierung verschiedener Standardisierungsansätze in der städtischen Planung wird deren Bedeutung gezeigt und Grenzen aufgrund des Anspruchs auf Einzelfallbezogenheit der Planung dargestellt. Gegenstand der Standardisierung müssen die verschiedenen Elemente des Einsatzes von GIS in der Planung sein. Als eine Herausforderung der aktuellen Entwicklung werden internetbasierte Dienste und eine verstärkte Nutzerorientierung herausgegriffen und diskutiert.

1. Einleitung

Die Standardisierung von Geoinformationssystemen (GIS) in der städtischen Planung stellt eine große Herausforderung dar. Standardisierung ermöglicht es, die Kommunikation und Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Akteuren und Systemen in einer zunehmend vernetzten Welt zu verbessern. Es bedarf dafür der Entwicklung technologischer und semantischer Standards für den Umgang mit GIS, deren Bedeutung als Informationsinfrastruktur innerhalb von Organisationseinheiten und über deren Grenzen hinweg stetig zunimmt. Angesichts der vielfältigen technologischen und praxisbezogenen Entwicklungen sollen, gemäß der entwicklungsbegleitenden Standardisierung, Erfahrungen und Anforderungen der Anwender einbezogen werden. Die Analyse des Fallbeispiels Berlins soll einen Beitrag leisten, indem aktuelle Entwicklungen von GIS in der städtischen Planung aufgezeigt und Anforderungen an die Standardisierung diskutiert werden. Es handelt sich um Zwischenergebnisse des Dissertationsvorhabens „Informationsmanagement in der städtischen Planung – Beitrag zur Operationalisierung von Fernerkundung“ im Graduiertenkolleg „Stadtökologische Perspektiven einer europäischen Metropolregion – das Beispiel Berlin“.

2. Standardisierung von Geoinformationssystemen in der städtischen Planung am Beispiel Berlin

2.1 Geoinformationssysteme in der städtischen Planung

Yade®, SICAD®, ArcView®, MapInfo®, das Kleingartenkataster, die webbasierten Systeme Umweltatlas, FIS – Broker (Fachübergreifendes Informationssystem - Broker) und Liegenschaftsauskunft der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, der webbasierte Broker im Bezirk Charlottenburg-Wilmersdorf ein Einblick in die Arbeit mit GIS in der Berliner

¹ DIPL.-GEOGR. TOBIA LAKES, Technische Universität Berlin, Institut für Landschaftsarchitektur und Umweltplanung, Franklinstr. 28/29, 10587 Berlin, e-mail: Lakes@ile.tu-berlin.de

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung.

Im Mittelpunkt jeder raumbezogenen Planung steht der Umgang mit Informationen, speziell raumbezogenen Informationen (Geoinformationen), und das methodische Grundgerüst der Planung wird als „komplexe Informationsverarbeitung“ eingestuft (Streich 1998). Die öffentliche Verwaltung und, im Rahmen zunehmender Auslagerung von Verwaltungsaufgaben, die Privatwirtschaft, besitzt als Geodatenutzer, -veredler und -anbieter eine große Bedeutung. In Berlin fällt der Aufgabenbereich der städtischen Planung, hier verstanden als Lenkung der räumlichen Entwicklung einer Stadt mit stadt- und landschaftsplanerischen Aufgaben, der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung zu. Letzterer ist auch die Vermessungsabteilung zugeordnet. Die Zweistufigkeit der Berliner Verwaltung und die Einheitsgemeinde Berlin erfordern die städtische Planung auf bezirklicher wie auf gesamtstädtischer Ebene. Als Beteiligte an Planungsprozessen bzw. am Austausch von Geodaten sind die Verwaltungen auf Senats- und Bezirksebene, Landesbetriebe und Landesämter sowie Träger öffentlicher Belange (TÖB) und die Öffentlichkeit zu nennen. Viele Planungen erfordern die Einbindung des Umlandes Brandenburg, um der Metropolregion Berlin und der potentiellen Fusion der beiden Bundesländer gerecht zu werden. In zunehmenden Maße gewinnt der vertikale Informationsaustausch zwischen Kommunal-, Landes-, Bundes- und EU-Ebene an Bedeutung, wie z. B. beim geodatenintensiven Monitoring der Strategischen Umweltprüfung (SUP) oder Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie (FFH) oder der Richtlinie über den freien Zugang zu Umweltinformationen für die Öffentlichkeit. Bei anhaltender Finanzknappheit diese neuen Zuständigkeiten abzudecken stellt die Verwaltung vor große Herausforderungen. In diesem Zusammenhang wird eine Verwaltungsmodernisierung mit Konzentration auf Geschäftsprozessmodellierungen und E-Government gefordert (BERNHARDT 2002).

GIS unterstützen seit mehreren Jahren den Umgang mit Informationen und die Informationsverarbeitung bei einer Vielzahl planerischer Fragestellungen und unterliegen dabei einer für die Informationssysteme typischen Entwicklung (vgl. auch Abb.2). Ein GIS wird hier verstanden als ein rechnergestütztes System, das aus Hardware, Software, Daten und Anwendungen besteht und es ermöglicht raumbezogene Daten digital zu erfassen und redigieren, speichern und reorganisieren, modellieren und analysieren sowie alphanumerisch und graphisch zu präsentieren (BILL/FRITSCH 1994).

Das erste GIS wurde in der städtischen Planung Berlins bereits in den 1980er Jahren eingeführt, in den 1990er wurden weitere mit dem Fokus auf der Vielfalt und Heterogenität von Geodaten und Datenbanken eingeführt. Zu den Pionieren der planungsunterstützenden GIS, den Umweltinformationssystemen (<http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/-umweltatlas/>, 8.6.2004), traten Ende der 1990er verschiedene Fachinformationssysteme hinzu, wie z. B. das Kleingartenkataster, Friedhofskataster, sowie Fachschalen, wie beispielsweise für die Landschaftsplanung. Seit einigen Jahren ist die Entwicklung der planungsunterstützenden GIS durch eine zunehmende Nutzer- und Dienstorientierung sowie durch eine verstärkte Netzwerkorganisation, insbesondere auch im Internet, gekennzeichnet. Proprietäre Systeme werden durch modulare, auf Diensten basierende Komponentensysteme, ersetzt (vgl. z. B. FIS-Broker, <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/geoinformation/fis-broker/de/uebersicht.shtml>, 8.6.2004).

Unter Diensten werden „Angebote jeglicher Art, die einen oder gleichzeitig mehrere Nutzer bei der Durchführung raumbezogener Aufgaben unterstützen“ verstanden (MENG & REICHENBACHER, 12.3.2003). Es handelt sich bei einem Dienst also um Softwarekomponenten mit in sich abgeschlossener Funktionalität, die über Schnittstellen

genutzt werden können. In diesem Spannungsfeld der planerischen Anforderungen an ein GIS stellen Standards die Voraussetzung für einen zielführenden Einsatz von GIS dar. Neben dem bereits erwähnten Standardisierungsbedarfs angesichts der Vielfalt von Geodaten, Diensten, Software und vor allem Anwendungen und Anwendern, müssen aktuelle Entwicklungen des E-Governments und der Geschäftsprozessmodellierung eingebunden werden (vgl. Abb. 1).

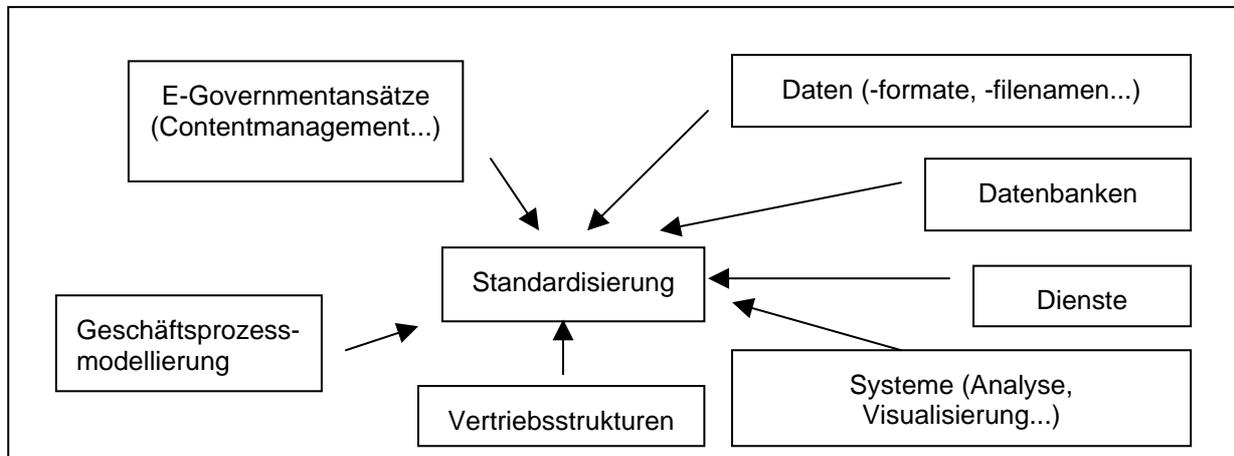


Abb. 1: Anforderungen an die Standardisierung von GIS in der Planung.

Eine zunehmende Integration von GIS in den Geschäftsprozess und Arbeitsablauf, wie es z. B. die Liegenschaftskatastrerauskunft oder das Content Management System (CMS) im Bezirk Mitte (http://mitte.srp-gmbh.de/gds_mitte/index.html, 8.6.2004) leistet, stellt eine neue vielversprechende Entwicklung dar. Ermöglicht werden diese Entwicklungen, die nicht mehr nur Daten transferieren, sondern auch den direkten Zugriff und die unmittelbare Bearbeitung ermöglichen, u. a. durch die technologischen Entwicklungen. Eine Diskussion der Chancen und Grenzen des Einsatzes kann an dieser Stelle nicht erfolgen, es sei stattdessen auf ein aktuelles Projekt zu diesem Thema in der Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung verwiesen (vgl. <http://www.intelcitiesproject.com>, 8.6.2004).

2.2 Standardisierung: von der Verwaltungsvorschrift bis zu DIN-Norm

Ziel der Standardisierung ist es, den Informationsaustausch zu ermöglichen, Datenredundanz zu reduzieren sowie Datenaktualität, -qualität und -vollständigkeit zu verbessern. Die technische und semantische Standardisierung von Daten für die Integration in ein GIS darf jedoch nicht, wie z. B. in Berlin bei dem Aufbau einer Biotoptypendatenbank befürchtet, die einzelfallspezifischen planerischen Entscheidungen einschränken. Hier ist eine Gradwanderung zwischen der Entscheidung im Einzelfall und der Vereinheitlichung von GIS notwendig (vgl. die Diskussion über eine automatisierbare Planung (SEUB 2000)). Daher bedarf es zunächst der Identifikation standardisierter, und auch standardisierbarer Anwendungen, Software, Hardware und Daten. Der Bedarf und die Problematik der Standardisierung verschiedener Aspekte von GIS in der städtischen Planung ist offensichtlich, und es liegt eine Vielzahl an Regelungen vor. Hierzu zählt klassischerweise die Normung als „planmäßige, durch interessierte Kreise gemeinschaftlich durchgeführte Vereinheitlichung von materiellen und immateriellen Gegenständen zum Nutzen der Allgemeinheit“ (vgl. DIN 820-1). Als internationales Synonym zur Norm wird der Begriff Standard verwendet, der das Ziel dessen beschreibt, was sich als Kompromiss zwischen rivalisierenden Zielsetzungen in der Praxis einpendelt. Hier ist bezüglich GIS insbesondere die ISO/TC 211 zu nennen, sowie die

Spezifikationen des Open GIS Consortiums (<http://www.opengis.org/>).

Es lassen sich bezüglich der Planung weitere Standardisierungsbestrebungen mit unterschiedlichen Merkmalen aufzeigen, aus denen es die jeweils beste Kombination auszuwählen gilt (vgl. Abb. 2). Die Bedeutung der Standards in der Praxis variiert in Abhängigkeit von den genannten Eigenschaften der Standardisierung. Wesentliche Einflussmöglichkeiten besitzen die meisten Standardisierungsansätze insbesondere bei Ausschreibungen, so dass weitere Detailregelungen entfallen können.

Differenzierung nach Merkmalen	Beispiele
Räumliche Ebene	kommunal: MERKIS, regional: CEN, national: DIN, global: ISO, ISPRS
Zeitliche Ebene/Aktualitätsgrad	gering: ISO/TC 211, hoch: Biotoptypenliste
Inhaltliche Ebene	Internet, Geodaten, planerische Anforderungen
Inhaltlicher Präzisionsgrad	gering: Allgemeine Empfehlung, hoch: Legende für die Erstellung von Biotoptypenkarten im Land Berlin
Grad der Formalität	gering: OGC, hoch: DIN
Grad der Rechtsverbindlichkeit	gering: Empfehlung einer Fachbehörde, hoch: rechtliche Festsetzung
Zielgruppe	Sachbearbeiter einzelner Fachabteilungen, Systementwickler
Rechtliche Hierarchieebenen	Gesetz, Verwaltungsvorschrift, ungesetzliche Standards

Abb.2: Differenzierung von Standardisierungsmöglichkeiten von GIS in der städtischen Planung.

Interessant für die Standardisierung von GIS in der Praxis sind insbesondere auch die Standards, die sich durch ihre quantitative Verbreitung entwickelten, wie z. B. die Formate des in der Berliner Verwaltung verbreiteten Yade® im Gegensatz zum sonst bundesweiten „ESRI®-Standard“.

3. Entwicklung und aktuelle Herausforderungen der Standardisierung

Es wurde gezeigt, dass einem hohen Standardisierungsbedürfnis von GIS eine Vielzahl an Standardisierungsansätzen gegenübersteht. Im folgenden wird ausgehend von der Entwicklung der Standardisierung von GIS der aktuelle Handlungsbedarf bezüglich webbasierter Dienste aus Sicht der Anwender näher erläutert.

3.1 Entwicklung der Standardisierung von GIS

In Anlehnung an die bereits erwähnten Entwicklungsrichtungen der GIS in der städtischen Planung am Fallbeispiel Berlin können die Schwerpunkte von Ansätzen der Standardisierung und Interoperabilität von GIS identifiziert werden (vgl. Abb. 3).

Ausgangssituation in Berlin war eine datenzentrierte Sichtweise bei den ersten GIS, die zunächst als Einzellösung, wie z. B. Yade, dann verstärkt über die Vernetzung proprietärer Systeme und Software eingeführt wurden. Hier standen demzufolge Standards für die Datenkonvertierung, den Datenaustausch oder Datensatzformate im Mittelpunkt (vgl. Abb. 2). Informationsverlust durch Konvertierung und/oder Austausch zwischen verschiedenen

Systemen und Datenstrukturen sollte weitestgehend vermieden werden. Allerdings ist z. B. auch heute der Austausch zwischen dem Berliner Yadeformat und dem ESRI-Format über einen Adapter noch nicht verlust- und fehlerfrei möglich. In dieser zunehmend heterogenen Umwelt von GIS sind Application Programming Interface (API), ein Standard für die Kommunikation zwischen verschiedenen Teilen der Computersoftware, von großer Bedeutung, wie z. B. ArcSDE oder CAD Reader. Standards wie OGC Simple Feature Specification für SQL sollen den Austausch von Geodaten und -objekten zwischen unterschiedlicher Software ermöglichen. Mit einer zunehmend vernetzten und modularen Systemarchitektur und der verstärkten Nutzung von Webtechnologien für verteilte Daten, Dienste und Anwender gewannen dann Standards für Webservices an Bedeutung (insb. Webservices von OGC oder ESRI – ArcIMS). Hier zeigt sich aus Sicht der Praxis ein großer Bedarf an neuen Standardisierungen, insbesondere bezüglich der Integration webbasierter Dienste und Content Management Systeme (CMS), auf die nun im folgenden eingegangen wird.

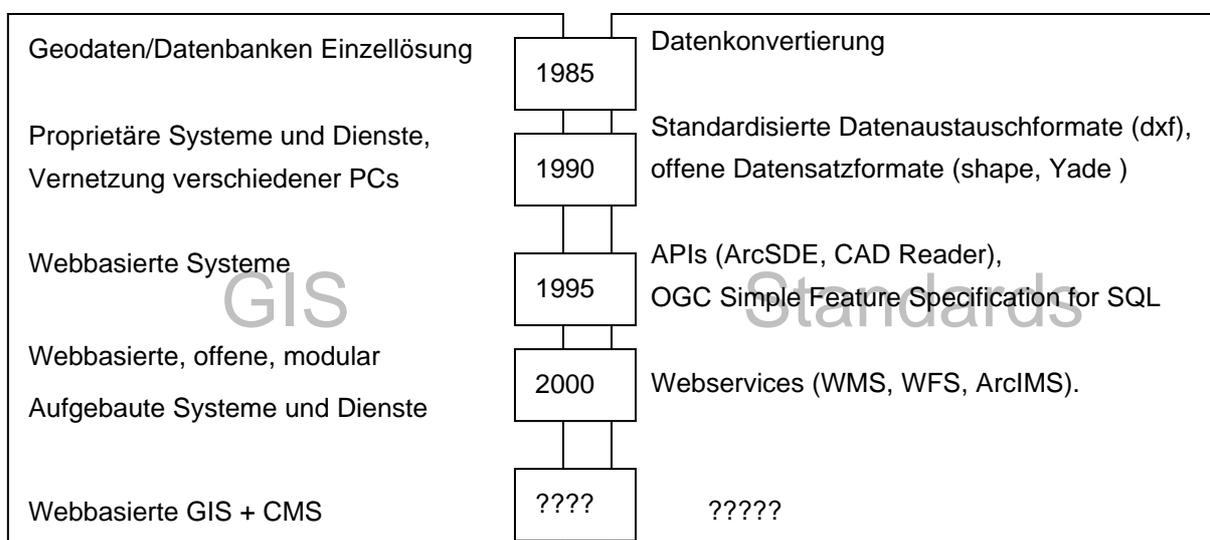


Abb.3: Zentrale Elemente der Entwicklungen in GIS und Standardisierung von GIS.

3.2 Webbasierte Dienste und E-Government

Die neuen Möglichkeiten des Umgangs mit Geodaten in der städtischen Planung auf der Basis einer vernetzenden Technologie über webbasierte Dienste und einer integrierenden und analysierenden über GIS erfordern die Verbindung von Standards aus dem GIS- und Internetbereich. Aktuelle GIS-Projekte in der Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, wie z. B. der FIS-Broker, weisen verschiedene webbasierte Dienste auf und zielen auf die Integration von GIS in den Geschäftsprozess und Arbeitsablauf. Die mittlerweile gängigen Standards der webbasierten Dienste von OGC, hierzu zählen WMS, WFS, WRS und WCS (vgl. auch <http://www.opengis.org/>), sind implementiert bzw. können implementiert werden. Darüber hinaus bedarf es jedoch weiterhin der Installation von GIS-Adaptoren für die Integration in die einzelnen unterstützten Geoinformationssysteme YADE, SICAD und ArcView. Die notwendigen Standards für die Ermöglichung von Web Services sind eine Reihe von Protokollen, insbesondere XML, SOAP, WSDL, UDDI, auf die hier nicht weiter eingegangen wird. Problematisch erweist sich in Verwaltungen die häufig notwendige Installation von Java an allen Arbeitsplätzen.

Eine Weiterentwicklung von Services bedarf es insbesondere in Richtung verteilter Dienste und Server. In Berlin beispielsweise existieren verschiedene Server, z. B. ein WMS Server im Bezirk Mitte, in der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und in weiteren Bezirken. Neben der Integration verschiedener Datenbanken und Metadatenbanken stellt sich das Problem der standardisierten Kommunikation verteilt vorliegender Services, die nacheinander oder parallel ablaufen könnten. Es wäre dann möglich, nicht nur Daten verteilt zu speichern und darauf zuzugreifen, sondern auch Dienste.

Webbasierte Dienste erleichtern bereits heute den Zugang zu verteilt vorliegenden Daten und ermöglichen damit einen schnelleren und vereinfachten Zugriff auf Daten. So können sie beispielsweise für Fernerkundungsdaten, deren Erhebung sehr kostenintensiv ist, eine Chance für den Einsatz durch verschiedene Nutzer für eine Vielzahl von Anwendungen bieten. Hier sei auf das erwähnte Monitoring in der Planung verwiesen, für das Fernerkundungsdaten einen wesentlichen Beitrag leisten können. An Erweiterungen der Spezifikationen zu Web Coverage Services, die auf die Einbindung eben solcher Fernerkundungsdaten zielen, wird zur Zeit gearbeitet (vgl. <http://www.opengis.org/>).

Die Integration von GIS und E-Government erfordert insbesondere die Beschäftigung mit der Verteilung und dem Vertrieb von Geodaten. Es existieren bereits verschiedene Portale auf kommunaler Ebene, die einen umfassenden Geodatenservice betreiben, wie z. B. der Stadt Aalen (vgl. <http://www.gisserver.de>). In Berlin steht eine solche Funktion noch aus. Problematisch erweist sich aus Anwendersicht die rechtliche und finanzielle Organisation des Datenaustauschs und -vertriebs.

4. Anforderungen an die Standardisierung

Anhand des Fallbeispiels der Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung konnten drei Aspekte aufgezeigt werden, die Einzelfallbezogenheit der städtischen Planung, die Vielfalt existierender Standardisierungsbestrebungen und der Schwerpunkt auf webbasierten Diensten und Verknüpfung von GIS und E-Government. Ausgehend von diesen Aspekten lassen sich die folgenden Anforderungen formulieren:

Die Problematik der Einzelfallbezogenheit der städtischen Planung versus des Anspruchs der Standardisierung von GIS wurde angerissen. Hier lässt sich insbesondere durch eine Differenzierung der Standardisierungsmöglichkeiten in der Planung und jeweils angemessene Auswahl an Standardisierungsmerkmalen, unter Berücksichtigung der jeweiligen Anforderungen der Planung, ein Mittelweg finden. Aufgabe der Verwaltung ist es, Anforderungsprofile der Standardisierung von GIS auszuarbeiten, in Zusammenarbeit mit bestehenden Standardisierungsgremien. Letzteres ist bislang nur in Ansätzen der Fall, denn die Standardisierungsgremien werden durch internationale privatwirtschaftliche Firmen dominiert. Wünschenswert wäre ein einheitliches Basisprofil für GIS in der städtischen Planung, das die genannte Vielfalt der bei der Standardisierung einzubindenden Elemente berücksichtigt. Dies müsste im Rahmen der entwicklungsbegleitenden Normung durch weitere Fallstudien geschehen.

Mithilfe der Differenzierung verschiedener Standardisierungsmerkmale wurde die Vielfalt existierender Standardisierungsbestrebungen aufgezeigt. Hier bedarf es der Zusammenführung und Koordination verschiedener Standards, verbunden mit der Forderung nach mehr Transparenz bei der Erstellung. Die Öffentlichkeitsarbeit sollte verbessert werden, eine Information der jeweiligen Zielgruppe der Standards findet in Ansätzen statt (vgl. <http://www.isotc211.org/>). Auch der Zugang zu offiziellen Standards, wie z. B. ISO, DIN,

sollte ausgeweitet und Foren oder Diskussionsrunden für eine verbesserte Zusammenarbeit mit der Praxis eingerichtet werden.

Die aktuelle Situation der Standardisierungsansätze von GIS gilt es vor dem Hintergrund der Entwicklung webbasierter Dienste und Verknüpfung von GIS und E-Government zu betrachten. Hier bedarf es weiterer Ansätze um die Ausgangssituation in der Praxis aufzugreifen und durch Standards eine einheitliche Entwicklung anzustoßen.

5. Ausblick

Wie gezeigt wurde, besteht ein hoher Standardisierungsbedarf von GIS in der städtischen Planung. Es bedarf im Rahmen der entwicklungsbegleitenden Normung einer verstärkten Beschäftigung mit den aktuellen Entwicklungen des Einsatzes von GIS. Welche Möglichkeiten der Standardisierung bestehen, welche Ebenen einbezogen werden können, wurde gezeigt. Bei den verschiedenen zu standardisierenden Elementen bedarf es der Überprüfung und Analyse, welche Art der Standardisierung den größten Erfolg verspricht. In den nächsten Jahren wird der Schwerpunkt auf der Standardisierung webbasierter Dienste liegen, hier ist der Input der Anwender gefordert. Darüber hinaus sei als abschließender Gedanke die höhere Gewichtung von Nutzern und Anwendern in Standardisierungsgremien angemerkt um wirtschaftlichen Interessen und Lobbyisten bei der Normung entgegenzutreten. Standardisierung von GIS stellt eine notwendige Voraussetzung für den Einsatz von GIS dar. Der tatsächliche Austausch von Daten, Diensten und Systemen scheitert jedoch häufig an organisatorischen, finanziellen und rechtlichen Aspekten. Die Bedeutung eines Informationsmanagements in Anlehnung an eine Geodateninfrastruktur sei an dieser Stelle betont.

6. Literaturverzeichnis

BILL, R. & D. FRITSCH (1994): Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Bd. 1 (Hardware, Software und Daten). Heidelberg : Wichmann.

SEUB M. (2000): Raumbezogene Planung - ein Gegenstand der Automation? Dissertation. Darmstadt: TU Darmstadt. 186 p.

STREICH B. (1998): Planungsethik in der Informationsgesellschaft. In: Streich BTK, editor. Planung als Prozeß - Von klassischem Denken und Zukunftsentwürfen im Städtebau. Bonn.

MENG, L. & T. REICHENBACHER (12.3.2003): Geodienste, Location Based Services und Geovisualisierungsdienste. Münchener Fortbildungsseminar Geoinformationssysteme, Technische Universität München: München. S. 1-12.

<http://www.gisserver.de>, 8.6.2004

<http://www.isotc211.org/>, 8.6.2004

http://mitte.srp-gmbh.de/gds_mitte/index.html, 8.6.2004

<http://www.opengis.org/>, 8.6.2004

<http://www.scri.salford.ac.uk/intelcity/>8.6.2004

<http://www.stadtentwicklung.berlin.de/geoinformation/fis-broker/de/uebersicht.shtml>,
8.6.2004

Committee Draft der ISO 19130 “Sensor and data models for imagery and gridded data“

WOLFGANG KRESSE¹

Abstract: In January 2004 the first Committee Draft of the project ISO/CD 19130 “Sensor and data models for imagery and gridded data“ was published. This standardization project describes the metadata that are necessary to georeference photogrammetric and remote sensing images. It distinguishes between rigorous methods that are built on a 3D geometry using sensor models and 2D solutions that use mathematical functions. The document also contains a definition of the involved coordinate reference systems and the transformations between them.

Presently a number of project teams of the ISO/TC 211 are working on new standards for imagery, gridded, and coverage data. The titles or the proposed titles of the those projects are ISO 19101-2 “Reference model – imagery”, ISO 19115-2 “Metadata – Part 2: Metadata for imagery and gridded data“, ISO 19118-2 “Encoding rules for imagery and gridded data, and “Calibration and validation“. The SensorML might become an implementation of the ISO/CD 19130.

1. Zielsetzung / Scope

Mit dem ISO/TC 211 “Geographic information / geomatics“ widmet sich die ISO seit 1994 auch der Normung für Geoinformatik. Nach der weitgehenden Fertigstellung der Normenfamilie für vektorbasierte Geoinformationssysteme wird seit etwa drei Jahren intensiv an den Normen für Bild- und Rasterdaten gearbeitet. Zur Zeit ist die ISO 19130 am weitesten entwickelt. Sie beschreibt im Wesentlichen die Georeferenzierung von Luftbildern und Satellitenszenen. Zusätzlich enthält die Norm einige Regeln für die Speicherung von Bild-daten sowie die Definition der erforderlichen Koordinatenreferenzsysteme einschließlich der Variablenbezeichnungen und der Transformationen. Im Januar 2004 wurde das erste Committee Draft (CD) fertiggestellt.

2. Gliederung ISO 19130

Das 1. Committee Draft der ISO 19130 gliedert sich in zwölf Kapitel und zwei Anhänge. Die Kapitel 1, 3 und 4 besitzen den Inhalt und die Bezeichnung, die für ISO-Normen einheitlich gilt [ISO/IEC1, 1997]. Die Kapitel 2 bis 5 sind innerhalb des ISO/TC 211 einheitlich. 1 Scope, 2 Conformance, 3 Normative references, 4 Terms and definitions, 5 Symbols and abbreviated terms. Der Scope bezeichnet den Wirkungskreis der Norm. Er ist eine Richtschnur für die Entscheidung über die Aufnahme oder das Weglassen von Randthemen. Das Kapitel Conformance legt fest, welche Kriterien erfüllt sein müssen, damit eine Software als normgemäß im Sinne der vorliegenden Norm bezeichnet werden darf. Das Kapitel Normative references nennt andere Normen, die als Grundlage für die vorliegende Norm ebenfalls gelten, deren Inhalt aber nicht erneut wiedergegeben wird. Das Kapitel Terms and definitions enthält die Definitionen der neuen Begriffe aus der vorliegenden Norm. Im übrigen gelten alle Begriffe, die vorher in anderen ISO-Normen schon einmal definiert wurden. Ähnliches gilt für mathematische Kürzel.

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

Das Kapitel 6 Georeferenceable dataset nimmt die globale Einordnung der ISO 19130 vor. Die für die Georeferenzierung erforderlichen Daten werden von der ISO als Metadaten eingestuft. Konsequenterweise ist daher die ISO 19130 eine Spezialisierung der bereits fertigen Norm ISO 19115 "Metadaten". Innerhalb von ISO 19115 gibt es eine Klasse MD_Georeferenceable, die dort nur rudimentär entwickelt ist. Viele weitere Attribute zu georeferenzierbaren Datensätzen enthält eine noch in der Entwicklung befindliche „Zwischennorm“, nämlich die ISO 19115-2 "Metadaten – Part 2: Metadaten für Imagery und gittertes Daten". Den speziellen Bereich der Georeferenz deckt dann die ISO 19130 ab.

Das Kapitel 7 Coordinate Systems enthält die Definition der Koordinatenreferenzsysteme. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht:

Name of coordinate reference system	Short name
Line sensor coordinate reference systems	LIS
Focal plane coordinate reference system	FOP
Aft optical coordinate reference system	AFO
Scan mirror coordinate reference system	SCM
Telescope coordinate reference system	TEL
Area sensor coordinate reference systems	ARS
Stereo model coordinate reference systems	SMO
Platform coordinate reference systems	PLA
Orbital coordinate reference systems	ORB
Paper and film scanners coordinate reference systems	SCA
Earth centred inertial coordinate reference system	ECI
Earth centred rotating coordinate reference system	ECR
Projected coordinate reference system	PRO

Tabelle 1: Koordinatenreferenzsysteme nach ISO/CD 19130

Das Kapitel 8 Sensor Types ist eine Beschreibung der Sensortypen, für die in der ISO 19130 die Georeferenzierungsdaten definiert werden. Es soll einem neuen Leser einen Überblick verschaffen und gegebenenfalls bei der sachgerechten Einordnung von Sensoren, die zum Zeitpunkt der Entwicklung der Norm noch nicht existierten, behilflich sein.

Das Kapitel 9 Location Model enthält alle Datenelemente (Attribute) für die Georeferenzierung. Dazu gehören die Sensorposition, die Drehwinkel und für einige Anwendungen auch die Beschleunigungskomponenten. Für die Positionsbestimmung von Satelliten ist die vollständige Beschreibung einer Keplerellipse enthalten.

Das Kapitel 10 Sensor Constituents enthält die Einzelbeschreibung von Sensorkomponenten. Die Gliederungsidee der ISO 19130 zerlegt gedanklich jedes Aufnahmesystem in seine Komponenten, z.B. in die Optik und den Sensor in der Bildebene. Jede Komponente wird einzeln mit ihren Attributen beschrieben, in den genannten Fällen z.B. die Kamerakonstante und die Positionen der Bildpixel. Für einen einzelnen Sensortyp, z.B. für die digitale photogrammetrische Kamera, werden die Komponenten zu einem in der Norm beschriebenen Gesamtsystem kombiniert. Die ISO 19130 beschreibt sechs Sensortypen: Scan Linear Array (Zeilenscanner mit Pendel- oder Rotationsspiegel), Pushbroom Array (Zeilenscanner mit fester Zeile), Digital Frame Camera (digitale photogrammetrische Kamera), Frame Camera (Rahmenkamera), Paper and Film Scanner (Kartenscanner und photogrammetrischer Scanner) und Virtual Sensor (virtueller Sensor mit Translations- und Rotationskomponenten für einfache Anwendungen). Die Detailbeschreibung der Sensorkomponenten wird bei der

Anwendung strenger geometrischer Lösungen der Georeferenzierung benötigt. Den Photogrammetern sind hier die Kollinearitätsgleichungen wohl vertraut.

Das Kapitel 11 Data Model beinhaltet Regeln für die interne Anordnung von Bilddaten. Es werden einfache n-dimensionale Zeilen, die bei einem Scanstreifen entstehen, von dem Riemannschen Hyperraum unterschieden. Letzterer erlaubt die Anwendung der Gesetze der Geometrie in Räumen mit vier und mehr Dimensionen und hat eine Bedeutung bei Gitterdaten, mit denen viele Attribute dargestellt werden.

Das Kapitel 12 Geolocation Information beschreibt im wesentlichen die flächenmäßigen Näherungsverfahren zur Georeferenzierung. Vier Verfahren werden unterschieden, die sich aber auf zwei Typen zurückführen lassen, nämlich den Zusammenhang zwischen Bild und Erdoberfläche über Polynomfunktionen und das Festlegen von Verschiebungsvektoren an Punkten eines regelmäßigen Gitters. Die entsprechenden Verfahren heißen polynomial fitting method und grid interpolation method. Das dritte Verfahren ratios of polynomial method benutzt gebrochen rationale Funktionen an Stelle einfacher Polynome. Das vierte Verfahren ist eine Mischung aus Polynomen und Gitter. Das Universal Real Time Model teilt den Raum in quaderförmige Zellen ein und definiert für jede Zelle eine eigene gebrochen rationale Funktion zur Beschreibung der Georeferenzierungsdaten. Die Größe der Zellen wird so klein gewählt, dass Interpolationsfehler vernachlässigbar werden. Dieses Verfahren wurde von den USA favorisiert, als die Rechner noch nicht schnell genug waren, um ausreichend genaue Lösungen immer in Echtzeit berechnen zu können. Daher rührt auch der Name Universal Real Time Model.

Der Anhang A legt die Details für die Prüfung von Software auf Conformance (Normgemäßheit) bezüglich der ISO 19130 fest. Der Anhang B enthält die formelmäßige Beschreibung der Transformationen zwischen den Koordinatenreferenzsystemen, die im Kapitel 6 definiert sind. Die folgende Tabelle zeigt diese Transformationen:

Linear sensor to platform coordinate reference systems	LIS to PLA
Area sensor to projected coordinate reference systems	ARS to PRO
Linear sensor to projected coordinate reference systems	LIS to PRO
Linear sensor to area sensor coordinate reference systems	LIS to ARS
Stereo model to projected coordinate reference systems	SMO to PRO
Platform to orbital coordinate reference systems	PLA to ORB
Platform to Earth centred coordinate reference systems	PLA to PRO
Orbital to Earth centred inertial coordinate reference systems	ORB to ECI
Earth centred inertial to Earth centred rotating coordinate r. s.	ECI to ECR

Tabelle 2: Transformationen zwischen den Koordinatenreferenzsystemen nach ISO/CD 19130

3. Modellbasierter Ansatz

Das ISO/TC 211 hat sich entschieden, alle Normen der ISO 19100 Familie in ein Gesamtmodell einzubinden. Als formale Modellierungssprache wurde die Unified Modeling Language (UML) gewählt. Sie ist sehr weit verbreitet und ermöglicht eine vollständige Beschreibung eines Datenmodells in Text und Graphik. Das Vorhandensein eines Gesamtmodells bedeutet noch nicht, dass alle Teilthemen ähnlich detailliert ausgeführt sein müssen. Allerdings sind eine klare Hierarchie und eine eindeutige Begriffswelt garantiert [Kresse, Fadaie, 2004].

Der Kern der Norm sind die UML-Klassendiagramme und die zugehörigen Detailbeschreibungen der Attribute, die so genannten Data Dictionaries. Außerhalb des verbindlichen Normdokuments existiert das vollständige UML-Modell im Format des Programms Rational

Rose. Zur Präsentation im Dokument wurden das Gesamtmodell in solche Teilmodelle zerlegt, die auf einer Buchseite noch gut lesbar dargestellt werden können. Ein Beispiel für ein Data Dictionary enthält Abbildung 4.

Innerhalb dieses Modells werden die Daten der Georeferenzierung nach ISO 19130 als Unterklasse der Metadaten betrachtet. Zum Komplex der Metadaten gehören eine ganze Reihe von Normen der ISO 19100 Familie. Der Mittelpunkt ist die ISO 19115 “Metadata“, Sie besitzt eine Klasse MD_Georeferenceable, die nur sehr wenige, gewissermaßen vorläufige, Attribute besitzt. Eine umfassende Spezialisierung dieser Klasse enthält die noch in der Entwicklung befindlich Norm ISO 19115-2 “Metadata – Part 2: Metadata for imagery and gridded data“. Die Georeferenzierung nach ISO 19130 folgt wiederum als Spezialisierung der Metadaten für Bild- und Gitterdaten.

Im folgenden werden die wichtigsten Teile des Datenmodells der ISO 19130 als UML-Klassendiagramme vorgestellt.

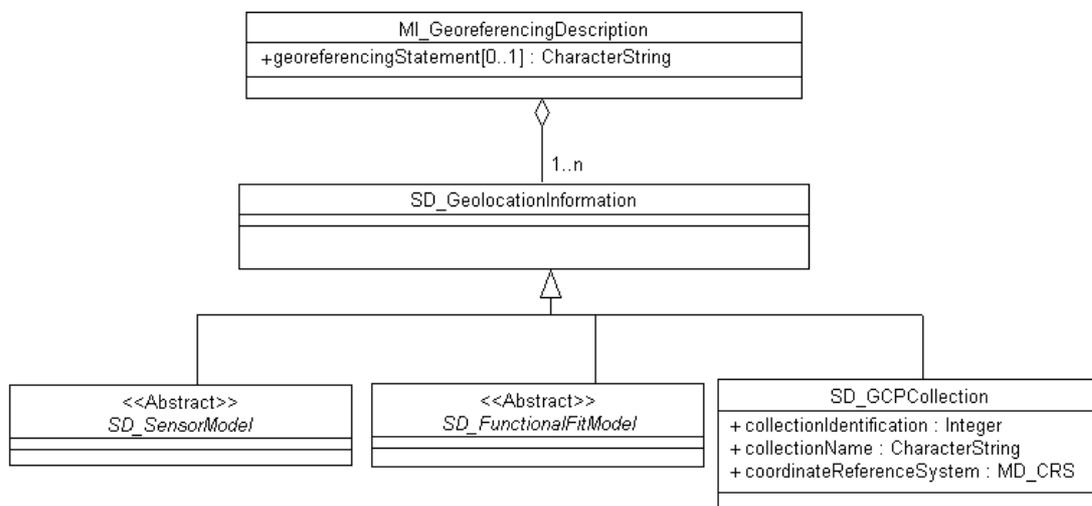


Abb. 1: Top-level model, Klasse SD_GeolocationInformation

Die oberste Klasse in der Hierarchie der ISO 19103 ist SD_GeolocationInformation. Die Abbildung 1 zeigt, wie diese Klasse mit der ISO 19115-2 verknüpft ist, nämlich über die Klasse MI_GeoreferencingDescription. Es gibt in der ISO 19130 drei Arten der Georeferenzierung. In der Klasse SD_SensorModel werden die strengen Verfahren beschrieben, mit denen die Abbildungsgeometrie soweit erforderlich mathematisch nachgebildet wird. In der Klasse SD_FunctionalFitModel werden die Näherungsverfahren beschrieben, die eine punktweise Zuordnung von Bild und Erdoberfläche in Verbindung mit Interpolationsfunktionen vornehmen. Die Klasse SD_GCPCollection schließlich beschreibt Passpunkte. Nach herkömmlichem Verständnis sind Passpunkte ein Teilaspekt der vorgenannten Klassen. Bei der Normentwicklung bestand die NASA aber auf einer eigenen Klasse, weil bei der NASA die Punktzuordnung zwischen Bild und Erdoberfläche ohne die Ableitung der Koeffizienten der Interpolationsfunktionen als eigenständiges Orientierungsverfahren gilt.

Die ISO 19130 versucht, zwei sich etwas widersprechende Konzepte zur Beschreibung unterschiedlicher Sensoren zu vereinen. Das eine Konzept normt eine bestimmte Anzahl von Sensortypen vollständig. Das andere Konzept normt nur Sensorkomponenten und überlässt es dem Nutzer, diese Komponenten für „seinen“ Sensor zu kombinieren. Die Klasse

SD_SensorComponent enthält die Beschreibung der Komponenten, beispielsweise Optik und Detektorarray. Die Klasse SD_SensorType enthält die in dieser Norm festgeschriebenen Sensoren und die Komponenten, aus denen sie aufgebaut sind.

Die drei wichtigsten Teile des Sensormodells sind die Sensorgeometrie, die Plattform und die Art der Georeferenzierung. Diese drei Teile werden mit den Klassen SD_SensorType, SD_Platform und SD_LocationModel beschrieben. Der genaue Zusammenhang der Klassen ist noch nicht endgültig festgelegt und wird daher hier nicht dargestellt.

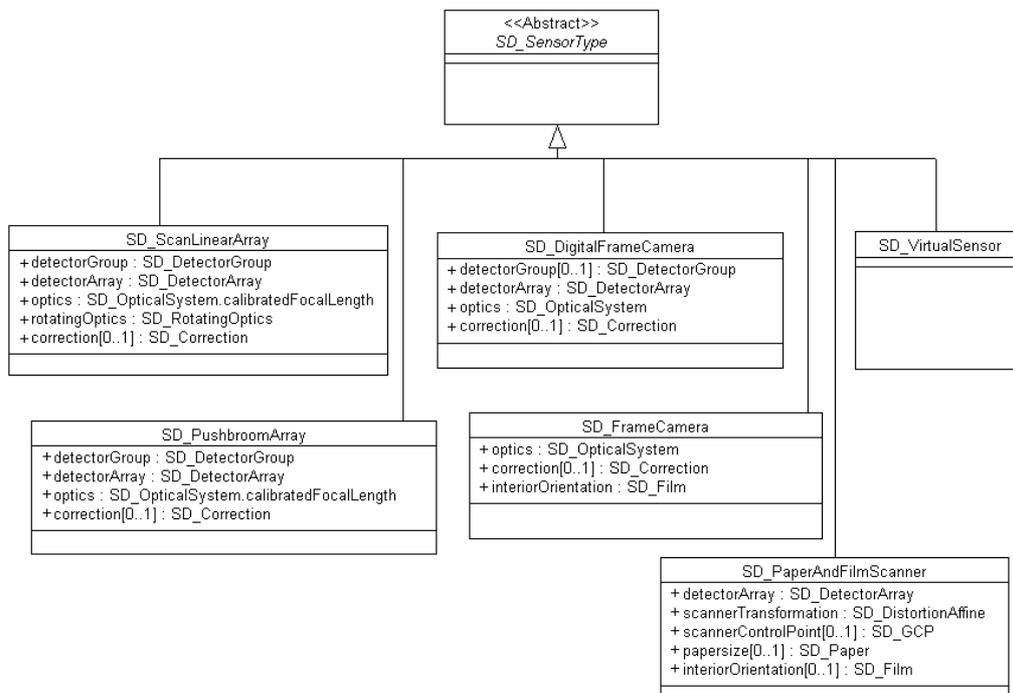


Abb. 2: Sensortypen, Klasse SD_SensorType

Die Klasse SD_SensorType besitzt sechs Unterklassen. In SD_ScanLinearArray sind die Zeilenscanner mit Pendel- oder Rotationsspiegel beschrieben. Die Klasse SD_PushbroomArray ist für Zeilenscanner mit fester Zeile vorgesehen. Die Klasse SD_DigitalFrameCamera enthält die Attribute für digitale photogrammetrische Kameras mit Flächenarray. Mit der Klasse SD_FrameCamera wird die klassische photogrammetrische Filmkamera beschrieben. Die Attribute für photogrammetrische Scanner und für Kartenscanner finden sich in SD_PaperAndFilmScanner. Die Klasse SD_VirtualSensor beschreibt einen abstrakten Sensor, der aus Rotations- und Translationskomponenten besteht. Die Idee ist, dass auf diese Weise eine neuer Sensor, der zu keiner der anderen Klassen passt, ersatzweise beschrieben werden kann.

Die Klasse SD_Platform ist für jene Systeme vorgesehen, die zur Beschreibung ihrer äußeren Orientierung mehr als das Sensor-, Modell- oder Geländekoordinatensystem benötigen. Eine Plattform kann zum Beispiel die stabilisierte Aufhängung einer Kamera oder ein Satellit, dessen Bahnparameter für die äußere Orientierung herangezogen werden, sein. Oft wird die Plattform für die Zuordnung von der GNSS- (GPS) und IMU-Daten zum Sensor benötigt.

Die Klasse SD_LocationModel beinhaltet die Parameter (Attribute) der äußeren Orientierung des Sensors.

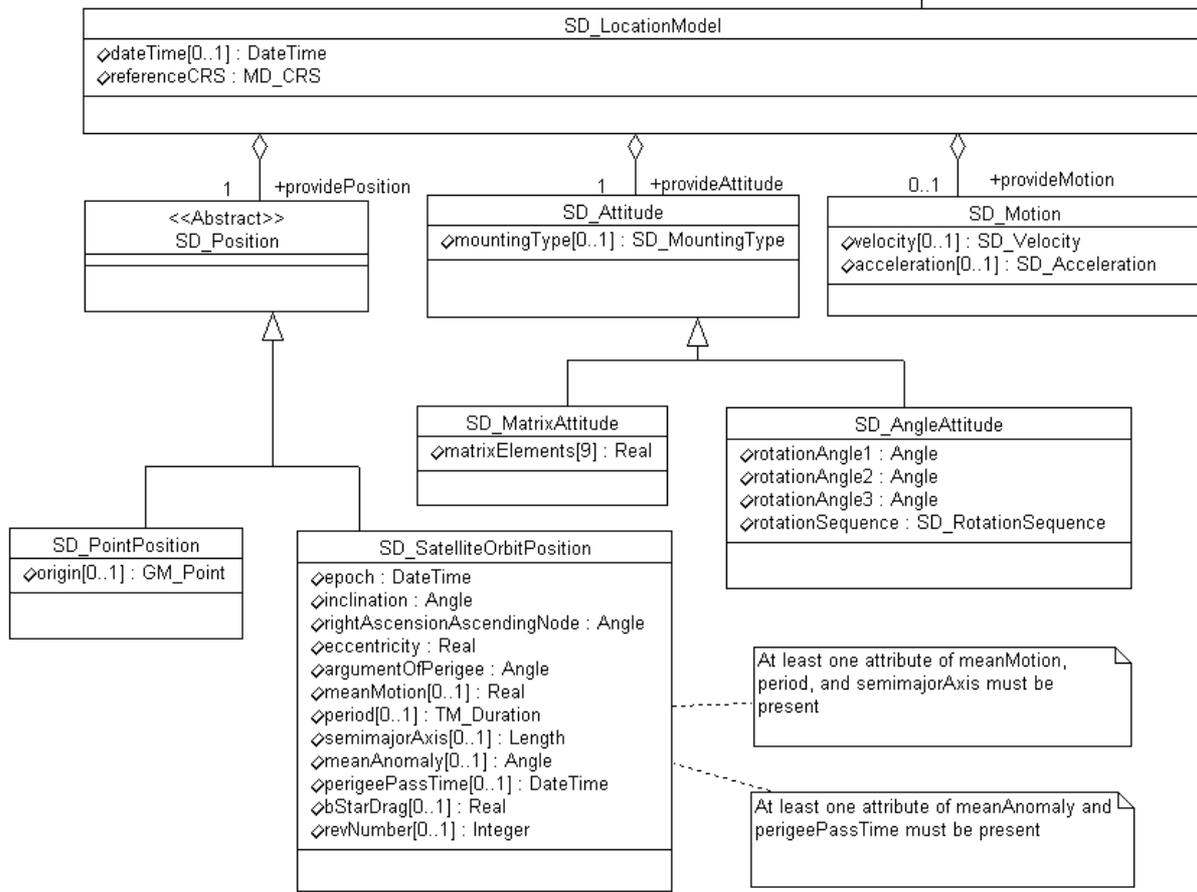


Abb. 3: Position, Neigung und Bewegung, Klasse SD_LocationModel

Diese Klasse gliedert sich in die Bereiche Positions-, Neigungs- und Bewegungsangaben. Die ersten beiden bilden die klassische äußere Orientierung.

Line	Name/ Role Name	Description	Obligation/ Condition	Max. Occ.	Type	Constraint
1	SD_LocationModel	information on location and orientation in space	Use obligation/condition from referencing object	Use maximum occurrence from referencing object	Aggregated Class (SD_Sensor Model)	
2	dateTime	moment when the image was taken	O	1	DateTime	
3	referenceCRS	coordinate reference system in which the sensor, the component, or the platform is located: the platform's coordinate system for a sensor mounted on a platform, or a ground coordinate reference system for an object is located relative to the Earth	M	1	MD_CRS	
4	Role name: providePosition	information about the position	M	1	Association	SD_Position
5	Role name: provideAttitude	information about the attitude	M	1	Association	SD_Attitude
6	Role name: provideMotion	information about velocity and acceleration	O	1	Association	SD_Motion

Abb. 4: Ausschnitt des Data Dictionary der Klasse SD_LocationModel

Die Abbildung 4 zeigt einen kleinen Ausschnitt des Data Dictionaries zur Klasse SD_LocationModel. Die Angaben in Spalte 2 finden sich im UML-Klassendiagramm wieder. Die Kürzel in Spalte 4 bedeuten M=mandatory (verpflichtend) und O=optional. Die Datentypen in Spalte 6 sind im gezeigten Beispiel einerseits in UML definiert, nämlich DateTime, und andererseits abgeleitet, nämlich MD_CRS. Die Details dieses Datentyps müssen in der zuständigen Klasse nachgelesen werden. In diesem Fall ist der Datentyp in der ISO 19115 "Metadata" definiert. Die ersten beiden Buchstaben "MD" deuten auf diese Norm hin. Die anderen beiden Buchstaben deuten auf den Begriff Koordinatenreferenzsystem hin. Innerhalb der Klasse MD_CRS gibt es die Attribute Projektion, Ellipsoid und Datum. Mit dem Festlegung des Datentyps MD_CRS werden die zugehörigen Attribute ebenfalls gewählt.

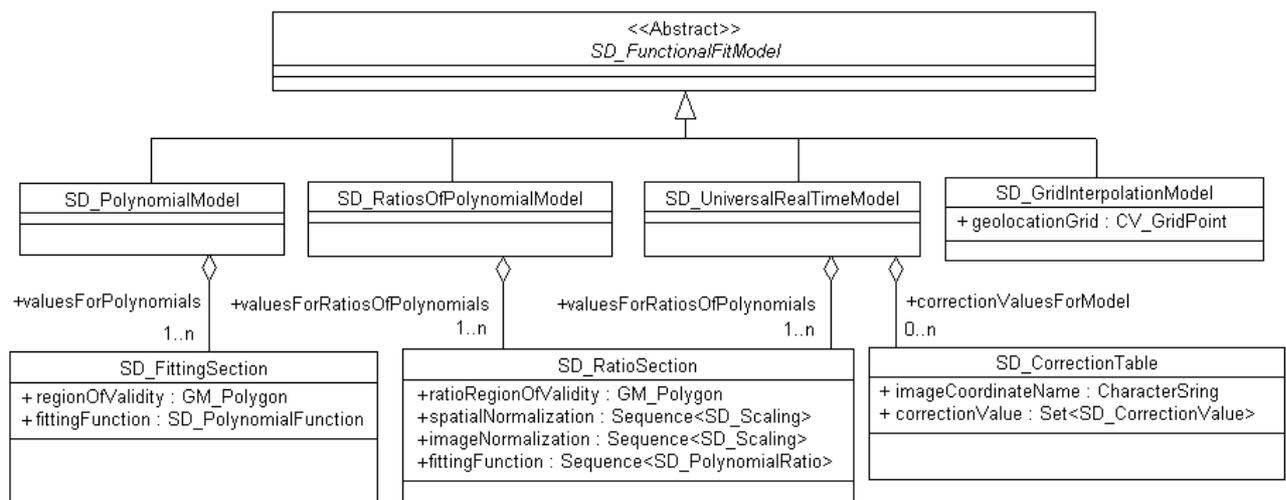


Abbildung 5: Funktionalmodelle, Klasse SD_FunctionalFitModel

Die Georeferenz über Interpolationsfunktionen ist das Thema der Klasse SD_FunctionalFitModel. Grundsätzlich können zwei Verfahren unterschieden werden, die Interpolation mit Polynomen, die sich über die ganze Bildfläche erstrecken, und die Interpolation zwischen den Maschen eines regelmäßigen Gitters. Das erst genannte Verfahren ist in SD_PolynomialModel enthalten. Es lässt Polynome beliebigen Grades zu. Der allgemeinere Fall der gebrochen rationalen Funktionen mit je einem Polynom im Zähler und im Nenner ist in SD_RatiosOfPolynomial definiert. Die Klasse SD_UniversalRealTimeModel ist wie schon oben beschrieben eine Mischung aus Polynomen und Gitter. Die Gitterinterpolation ist in SD_GridInterpolationModel enthalten.

Die Klasse SD_GCPCollection enthält die Attribute einer Passpunktliste. SD_GCP ist für einen einzelnen Passpunkt vorgesehen. Die ISO 19130 unterscheidet zwischen vier verschiedenen Arten von Passpunkten. Die in der Photogrammetrie bekannten Passpunkte, die aus Punktnummer und zwei oder drei Koordinaten bestehen, finden sich in der Klasse SD_GCPSurvey, deren Namen auf die mit Vermessung bestimmten Passpunkte hinweist. Die anderen drei Arten wurden vor allem von der NASA favorisiert. Ein Passpunkt nach SD_GCPLocation besteht aus einem Geländepunkt mit zwei oder drei Koordinaten und einem Bildpunkt mit zwei Koordinaten. Wie schon oben erwähnt, ist es dem Benutzer überlassen, aus den gewählten Passpunkten selbst die Koeffizienten abzuleiten. Die zwei weiteren Arten von Passpunkten beinhalten weniger oder gar keine Koordinateninformation und finden in militärischem Umfeld Anwendung, wo die Veröffentlichung von Koordinaten sehr restriktiv gehandhabt wird.

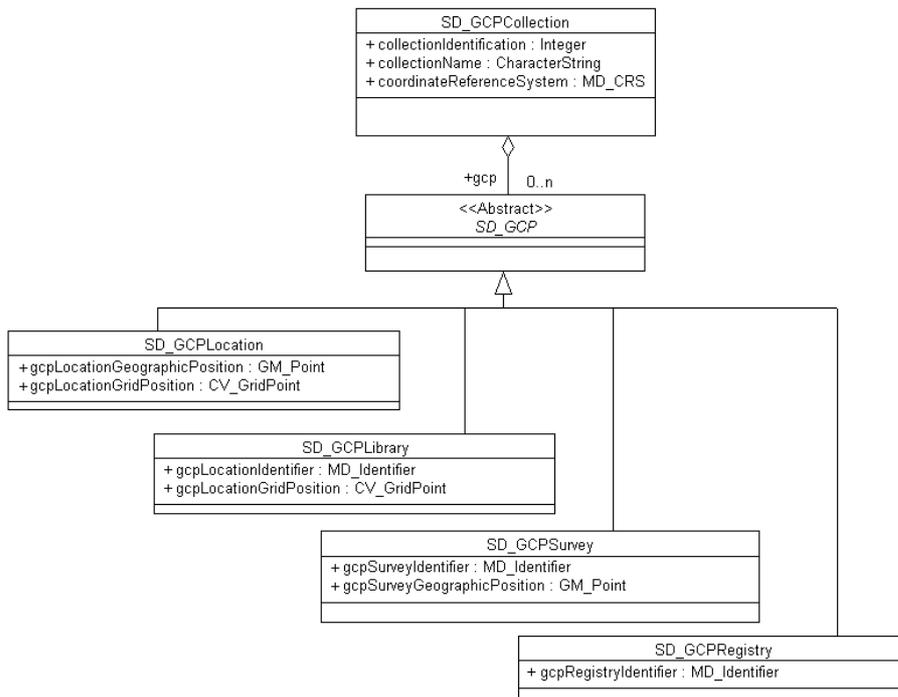


Abb. 6: Passpunkte, Klasse SD_GPCCollection

4. Andere aktuelle Normungsprojekte

4.1 ISO 19101-2 “Reference model - imagery“

Aus der Sicht des ISO/TC 211 ist die Geoinformatik eine Spezialisierung der Informatik. Grundsätzlich gelten die Standards der Informatik. Nur dort, wo diese nicht ausreichen, werden eigene für die Geoinformatik entwickelt. Die Grundlage zur Einbettung der Geoinformatik in die Informatik bildet die ISO 19101 „Reference model“. Hier wird vor allem auf den Viewpoint des RM-ODP (Reference Model – Open Distributed Processing) [ISO/IEC 2] aufgebaut. Ein Viewpoint ist eine Sicht auf ein zu entwickelndes Softwaresystem, z.B. die Sicht des Marketings. Die fünf genormten Sichten sollen helfen, dass möglichst alle Anforderungen an eine Softwareentwicklung vorher durchdacht werden. Der Enterprise Viewpoint beschreibt die Sicht des Managements und des Marketings. Der Information Viewpoint beschreibt die inhaltlichen Aspekte. Der Computational Viewpoint beschreibt die Verbindung zwischen System und Benutzer. Der Engineering Viewpoint beschreibt die technische Realisierung bezüglich Betriebssystemen und Internet. Der Technology Viewpoint beschreibt die Hardwareaspekte.

In Ergänzung zur ISO 19101 befasst sich die ISO 19101-2 „Reference model - imagery“ mit den Besonderheiten für Bilddaten. Dazu gehört der Entwurf für typische Anwendungsszenarien, um die Entwicklung und das Verständnis der Bilddatennormen zu erleichtern. Interessant ist insbesondere der Anspruch an die zu entwickelnde Norm. Sie soll von der Datenerfassung für Bilddaten bis zu wissensbasierten Analysen reichen und auch Systeme für die Entscheidungsfindung einschließen.

Nach dem aktuellen Zeitplan soll die ISO 19101-2 im April 2006 das Stadium Draft International Standard erreichen und im Oktober 2007 als internationale Norm veröffentlicht werden.

4.2 ISO 19115-2 “Metadata - Part 2: Metadata for imagery and gridded data“

Die Metadaten für Geoinformationssysteme werden sehr umfassend in der ISO 19115 „Metadata“ festgelegt. In dieser Norm ist allerdings der Bereich der Rasterdaten weitgehend ausgespart, weil die entsprechenden ISO 19100 Normen damals noch nicht weit genug entwickelt waren. Rasterdaten ist ein etwas ungenauer und auch nicht mehr ganz aktueller Begriff. Die ISO unterscheidet Bilddaten (imagery), Gitterdaten (gridded data) und Coverages. Zu den Gitterdaten gehören unter anderem die digitalen Höhenmodelle. Coverages stehen in der Theorie dem physikalischen Feld nahe. Mit ihnen können zwei- und dreidimensionale Phänomene Flächen deckend oder Volumen füllend beschrieben werden. Als Beispiele seien die Temperatur und die Strömung in einem Wasserkörper genannt.

Die ISO 19115-2 beschreibt die zugehörigen Metadaten. Nach dem aktuellen Entwurf werden die Einzeldaten in die Bereiche Inhalt (Content), Identifizierung (Identification), Qualität (Data quality), räumliche Zuordnung (Spatial representation) und Gültigkeitsbereich (Extent) gegliedert. Die Georeferenzierung als Spezialisierung der räumlichen Zuordnung ist in der Spezialnorm ISO 19130 enthalten.

Nach dem aktuellen Zeitplan soll die ISO 19115-2 im September 2005 das Stadium Draft International Standard erreichen und im März 2007 als internationale Norm veröffentlicht werden.

4.3 ISO 19118-2 “Encoding rules for imagery and gridded data“

Die Bilddatenformate spielen für einen „genormten“ Datenaustausch eine zentrale Rolle. Seit langem sind einige von Industriefirmen oder Konsortien entwickelte Datenformate vorherrschend. Die bekanntesten Beispiele sind TIFF, JPEG, GIF und BMP. Die meisten Bildverarbeitungsprogramme können eines oder mehrere dieser Formate lesen und/oder schreiben. Die Neuentwicklung eines Firmen unabhängigen Formates erscheint nicht sinnvoll, da die Akzeptanz wahrscheinlich gering sein würde.

Die genannten Formate besitzen jedoch vielfach Einschränkungen, die in vielen Fällen die Anwendung behindern. TIFF beispielsweise bietet Tags zur Speicherung von anwendungsspezifischen Metadaten. Die technisch möglichen Tags sind heute praktisch alle vergeben. Daher ist es sinnvoll, mittelfristig ein Datenformat anzustreben, das die Einschränkungen der heute bekannten Formate überwindet. Die noch in der Planung befindliche ISO 19118-2 “Encoding rules for imagery and gridded data“ soll einen Rahmen für die Entwicklung eines solchen Formates schaffen. Bewusst wurde der Name „encoding rules“, also Codierungs-Regeln, an Stelle des einfacheren „encoding“ gewählt.

4.4 ISO 19xxx “Calibration and validation“

Seit Jahrzehnten sind internationale Standards für die Kalibrierung von Bildsensoren in den Arbeitsgruppen der ISPRS entwickelt worden. Mit der Fernerkundung kam die Validierung hinzu. Das ist der Abgleich zwischen Bildinformation und Testflächen auf dem Boden. Für

die Validierung wurden internationale Standards vor allem von CEOS vorgeschlagen. Im November 2002 haben CEOS und die Commission I der ISPRS zusammen die „Joint Task Force on Calibration and Validation“ gegründet. Der erste größere Workshop fand im Dezember 2003 in Gulfport, Mississippi, USA statt. Hier wurden die vielfältigen Erfahrungen in Kalibrierung und Validierung ausgetauscht und die Möglichkeiten zur Weiterentwicklung dieser Standards zu einer ISO-Norm ausgelotet.

Nach aktuellem Planungsstand soll es ein Normungsprojekt „Calibration and Validation“ im ISO/TC 211 geben.

4.5 SensorML

SensorML steht für Sensor Modeling Language. Die SensorML ist eine Ausformung der Markupsprache XML. Die Struktur von SensorML ist derjenigen der ISO 19130 ähnlich. Mit den in SensorML definierten Tags können die Parameter (Attribute) für die Georeferenzierung von Sensoren beschrieben werden. Mit SensorML können daher diese Daten für jeden heutigen Internetbrowser lesbar dargestellt werden.

Ursprünglich war SensorML eine Entwicklung im Auftrag der NASA zur einheitlichen Beschreibung ihrer Sensoren. Eingeschlossen waren Satelliten und Flugzeug gestützte Fernerkundungssensoren, in-situ Sensoren für die Wetterbeobachtung und andere. Inzwischen wurde SensorML als anwendungsnahe Lösung für die abstrakte Norm ISO 19130 weiterentwickelt. Dafür wurden im Laufe des Jahres 2003 die Datenmodelle beider Ansätze, ISO 19130 und SensorML, aufeinander abgestimmt.

Die SensorML wird zwar seit einem Jahr auch von dem Open GIS Consortium (OGC) unterstützt, hat aber weiterhin nur den Status eines Discussion Papers. Zur Zeit scheint das OGC die Fertigstellung des „Reference model - Imagery“ (ISO 19101-2) zu favorisieren, um erst zu einem späteren Zeitpunkt die SensorML wieder aufzugreifen.

5. Zeitplan ISO 19130

Die maximale Entwicklungszeit einer ISO-Norm ist fünf Jahre. Die Arbeiten an der ISO 19130 begannen im März 2001 und müssen daher zum Beginn 2006 fertig werden. Der derzeit gültige Zeitplan ist folgender:

März 2001	New Work Item Proposal
Mai 2001	Projekt bestätigt
Januar 2004	1. Committee Draft (CD)
Dezember 2004	2. Committee Draft (CD)
Juni 2005	Draft International Standard (DIS)
Dezember 2005	International Standard (IS)

In der Sitzung des Editing Committees für ISO 19130 im Mai 2004 wurden erhebliche Änderungen des 1. Committee Drafts gefordert, insbesondere von Vertretern der Normungsgruppen für Computer Graphics (ISO/IEC JTC1 SC24) und von militärischer Seite (DGIWG, NATO). Bedauerlicherweise hatten die Vertreter dieser Gruppen erst im jetzigen Stadium ihre aktive Mitarbeit in der Arbeitsgruppe begonnen und zusätzliche Erfahrungen und Wünsche eingebracht. Obwohl die Ergänzungen die Qualität und die Akzeptanz der Norm noch einmal erhöhen werden, ist die Verzögerung um weitere sechs Monate ärgerlich. Trotzdem ist

weiterhin eine Fertigstellung der ISO 19130 innerhalb der Maximalfrist von fünf Jahren gewährleistet.

Literaturverzeichnis

ISO/IEC1 (1997): ISO/IEC Directives, Part 3, Rules for the Structure and Drafting of International Standards, ISO, Genf, Schweiz, 1997

ISO/IEC2 (1998): ISO/IEC 10746-1:1998, Information technology – Open Distributed Processing – Reference model: Overview

Kresse, W., K. Fadaie (2004): “ISO Standards for Geographic Information“, Springer Verlag, Heidelberg, New York, Tokyo

Abkürzungen

ISO/IEC JTC1 SC24: International Organization for Standardization / International Electrotechnical Commission, Joint Technical Committee 1, Subcommittee 24 “Computer graphics and image processing“

DGIWG: Digital Geographic Information Working Group (North Atlantic Treaty Organization, NATO)

Anwendung sehr hochauflösender Satellitenbilddaten zur urbanen Biotop- und Nutzungstypenkartierung - dargestellt am Beispiel der südkoreanischen Megastadt Seoul

BIRGIT KLEINSCHMIT¹ & HYUN-OK KIM²

Zusammenfassung: In der südkoreanischen Metropole Seoul wurde erstmalig 1999 eine terrestrische Biotoptypenkartierung durchgeführt. Aufgrund fehlerhafter Kartierungen sowie der schnellen Veränderungen der Flächennutzung ist eine ständige Aktualisierung bzw. Fortführung der Daten für zahlreiche Planungsaufgaben von großer Bedeutung. Für diese Aufgabe bietet die moderne Satellitenfernerkundung ein großes Potential. Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen der Untersuchung die Anwendungsmöglichkeiten von IKONOS-Daten zur Aktualisierung der Biotop- und Nutzungstypenkartierung Seouls erprobt. Hierzu wurden typische urbane Siedlungsstrukturen ausgewählt und mit Hilfe eines kombinierten pixel- und segmentbasierten Verfahrens analysiert. Ergebnisse der Untersuchung sowie die aufgetretenen Probleme und das sich daraus ableitbare Anwendungspotential werden in dem Beitrag dargestellt und diskutiert.

1 Einleitung

Die Flächennutzung in Metropolregionen wie Seoul unterliegt einem sehr schnellen Wandel, welcher eine ständige Aktualisierung bzw. Fortführung der Biotop- und Nutzungstypen-(BTNT) Kartierung als Grundlage für zahlreiche Planungsaufgaben erforderlich macht. Eine flächendeckende rein terrestrische Kartierung der BTNT wurde in Seoul erstmalig 1999 durchgeführt. Da die Verfügbarkeit von Luftbildern in Korea aus militärischen Gründen begrenzt ist, wurde hierbei auf eine fernerkundliche Vorkartierung verzichtet. Im Rahmen der Geländekartierung wurden von sieben Messtrupps Daten über Landnutzung, Versiegelung und Vegetation erhoben, die Informationen in ein geographisches Informationssystem integriert und anschließend daraus die BTNT abgeleitet. Diese terrestrischen Kartierergergebnisse sind jedoch mit unterschiedlichen Fehlern behaftet. Ein Hauptproblem liegt in der Aufnahmeme-

¹ Prof. Dr. Birgit Kleinschmit, Institut für Landschaftsarchitektur und Umweltplanung, TU Berlin, Franklinstr. 28/29, 10587 Berlin, E-Mail: birgit.kleinschmit@tu-berlin.de

² M.Sc. Hyun-Ok Kim, Institut für Landschaftsarchitektur und Umweltplanung, TU Berlin, Franklinstr. 28/29, 10587 Berlin, E-Mail: kim@ile.tu-berlin.de

thode des Grünflächenanteils, da Begehbarkeit und Einsichtnahme von Grundstücken nur eingeschränkt möglich waren und daher die Flächenanteile dort häufig geschätzt werden mussten. Ein weiteres Problem liegt in dem hohen Maß an Subjektivität des Verfahrens, verursacht durch den Einsatz einer Vielzahl von Hilfskräften. Es besteht daher von Seiten der Stadtverwaltung die Forderung nach einer verbesserten und objektiveren Fortführung und Aktualisierung der BTNT-Kartierung.

Die aktuellen Entwicklungen im Bereich der Fernerkundungs- und Bildverarbeitungstechniken eröffnen für diese Fragestellung neue Möglichkeiten der digitalen automatisierten Auswertung. Hierbei bieten besonders neue Satellitensysteme mit sehr hoher geometrischer Auflösung ein großes Potential. Durch die hohe geometrische und radiometrische Auflösung sind die Möglichkeiten für die klassische visuelle Interpretation und Abgrenzung verschiedener Oberflächenbedeckungen aufgrund der leichteren Identifizierbarkeit von Details erheblich verbessert (BLASCHKE et al. 2002). Besonderes Augenmerk muss gerade im Hinblick auf eine kontinuierliche Fortführung der Daten auf die Potentiale der automatisierten Datenauswertung gelegt werden. Vor diesem Hintergrund wurde untersucht, inwieweit sehr hochauflösende IKONOS-Satellitendaten einen Beitrag zur Fortführung und Aktualisierung der BTNT-Kartierung in Seoul liefern können.

2 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage

2.1 Darstellung des Untersuchungsgebietes

Die mit über zehn Millionen Menschen besiedelte Metropole Seoul ist durch eine sehr heterogene Flächennutzung mit hoher Nutzungsintensität gekennzeichnet. Als Untersuchungsgebiet wurde ein im Zentrum befindlicher ca. 600 ha großer Stadtteil ausgewählt, welcher diese Eigenschaften widerspiegelt. Im nordwestlichen Bereich befindet sich das Regierungsviertel mit einem hohen Grünanteil. In der Mitte



des Bildausschnittes liegt eine große Parkanlage, südlich davon schließt sich ein Areal mit überwiegend gewerblicher Nut-

zung an. Der übrige Bereich des Untersuchungsgebietes ist durch eine mit Hochhäusern bebaute Großwohnsiedlung geprägt. Das gesamte Gebiet ist durch einen grünen Gürtel aus Park- und naturbelassenen Grünanlage umgeben.

2.2 Datengrundlage

Für die Untersuchung stand eine wolkenfreie IKONOS-Szene von 27. November 2000 vom Typ CATERRA Geo zur Verfügung. Sensorparameter lagen hierzu nicht vor. Durch die zeitliche Nähe zur terrestrischen Kartierung von 1999 sind die Ergebnisse miteinander vergleichbar. Die Szene ist im Off-Nadir aufgenommen, was zu starken Kippungen und Schattenwürfen, besonders in den hochbebauten Großwohnsiedlungen geführt hat.

Bei der Überlagerung der Biotoptypenkartierung mit der Satellitenaufnahme konnten visuell verschiedene Kartierfehler der terrestrischen Aufnahme festgestellt werden. Einige Beispiele werden im Folgenden dazu aufgeführt. In Abbildung 2a ist die Problematik der subjektiven Auslegung der Kartieranleitung sichtbar. Im Bereich des Regierungsviertels wurde eine Unterteilung des Baublockes in den BTNT „Öffentliche Einrichtungen“ und „Angepflanztes Grün“ vorgenommen. Ähnliche Bebauungstypen wurden von anderen Kartiergruppen als ein gesamter BTNT „Öffentliche Einrichtungen“ erfasst. Die Grünanteile der einzelnen Flächen sind dem entsprechend sehr unterschiedlich bewertet worden. Ein weiteres Beispiel befindet sich in dem Großwohnsiedlungsgebiet (Abb.2b). Hier wurde entgegen der Kartieranleitung das zum Wohngebiet gehörige Grün getrennt als BTNT „Angepflanztes Grün“ aufgenommen. Dadurch ist diese Siedlung trotz des relativ hohen Grünanteils als ein Biotoptyp „Großsiedlung mit sehr hohem versiegeltem Flächenanteil“ ausgewiesen worden. Bei der Aufnahme von Parkflächen wurde der Grünflächenanteil grundsätzlich auf 100 % festgelegt. Dies ist, wie die Abbildung 2c zeigt, eine fehlerhafte Pauschalierung des Grünanteils, da auch in diesen Flächen durchaus Versiegelungen in Form von Wegen, Parkraum oder gepflasterten Plätzen vorkommen.

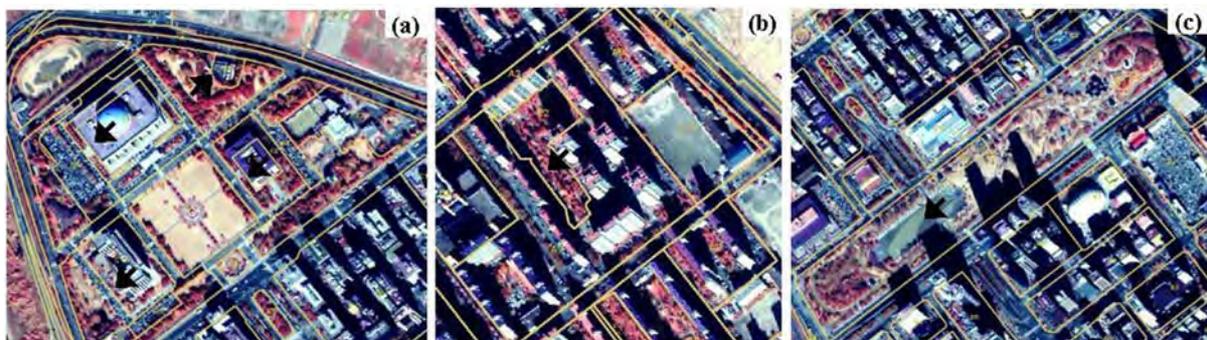


Abb. 2: Beispiele für Fehlkartierungen der terrestrischen BTNT-Kartierung

3 Auswertungsverfahren

In der städtischen BTNT-Kartierung ist der Anteil der Grünflächen bzw. versiegelten Flächen eine wichtige Kenngröße. Die Versiegelung von Wohn-, Gewerbe-, Industrie- sowie Verkehrsflächen werden laut Kartieranleitung in Gruppen unterschiedlicher Versiegelungsanteile unterteilt, z. B. gibt es den Typ „Wohnflächen in Form von Einfamilienhäusern mit über bzw. unter 70 % versiegeltem Flächenanteil“ (SEOUL, 2002), welches 30 % Grünanteil entspricht. Bisherige Studien haben ein besonderes Augenmerk auf die Verteilung des Grüns gelegt, da die eindeutigen spektralen Eigenschaften von Vegetation eine automatische Extraktion von vegetationsfreien und vegetationsbedeckten Flächen ermöglichen. Der hohe Detaillierungsgrad der IKONOS-Satellitendaten lässt sogar eine Erkennung von kleinen Objekte wie z. B. von Einzelbäumen zu. Ein weiterer Grund für die Analyse der vegetationsbedeckten Flächen war, dass diese weniger von den negativen Bildeigenschaften der Verzerrung und Kippung beeinflusst sind, und damit eine automatisierte Auswertung möglich ist. Hierbei ist anzumerken, dass der Grünanteil als Mindestgrünanteil erfasst wurde, da in den Schattenbereichen keine ausreichenden spektralen Informationen zur Verfügung standen.

Für die Auswertung mittels der Bildanalysesoftware ERDAS Imagine[®] 8.6 und eCognition[®] 3.0 wurde zunächst der panchromatische Kanal mit den multispektralen Kanälen fusioniert, so dass ein geschärftes Multispektralbild mit einer Bodenauflösung von einem Meter zur Verfügung stand. Mit Hilfe von über 30 Passpunkten aus der topographischen Karte wurde der Bildausschnitt mit einer Lagegenauigkeit von drei Metern georeferenziert. Da das Untersuchungsgebiet eine geringe Relieffierung aufweist, war die Verwendung eines digitalen Geländemodells nicht erforderlich.

Für die Klassifikation wurde eine Kombination aus einem pixelbasierten und segmentbasierten Ansatz gewählt. Bei dem segmentbasierten Verfahren hängt die Klassifikationsgenauigkeit zunächst von einer erfolgreichen Segmentierung ab, die eine Aufteilung des Datensatzes in möglichst homogene Teilflächen ermöglicht, welche anschließend als Basiseinheiten für die Klassifikation dienen. Der Segmentierungsvorgang mittels eCognition fasst Einzelpixel nach bestimmten Homogenitätskriterien hinsichtlich ihrer spektralen Signaturen zu Pixelgruppen bzw. Segmenten zusammen. Dabei besteht das Problem, dass die Segmentgrenzen nicht immer thematisch sinnvoll verlaufen, da innerhalb eines BTNT sehr stark variierende Reflexionswerte vorliegen (LESER 2002). Gerade in den sehr heterogenen urbanen Bereichen, die durch einen kleinräumigen Wechsel aus Bebauung, Vegetation sowie Schatten und Fassaden gekippter Gebäude geprägt sind, treten Fehlsegmentierungen auf. Um den Anteil der fehlsegmentierten Flächen zu reduzieren, wurde eine pixelbasierte Vorklassifikation mit ERDAS durchgeführt. Hierbei wurden die drei Klassen Vegetation, Nicht-Vegetation und Schatten durch eine Maximum-Likelihood-Methode überwacht klassifiziert. Dabei wurden (pan-

sharpened) multispektrale Merkmale berücksichtigt. Zur Verringerung des „Salt and Pepper-Effects“ wurde das Klassifikationsergebnis mit einem Majority-Filter verbessert. Die Einbeziehung dieser Ergebnisse als thematische Daten bei der Segmentierung mit eCognition verhinderten die gemischte Segmentbildung zwischen Vegetation, Nicht-Vegetation und Schatten.

Bei der Überprüfung der Ergebnisse der Vorklassifikation sind in der Klasse „Vegetation“ Fehler erkannt worden. So wurden beispielsweise vegetationsfreie Schulhöfe, Tennis- sowie Spielplätze fälschlicherweise als Vegetation klassifiziert. Als Ursache wird der Zeitpunkt der Aufnahme angesehen, da im November die Vegetation nicht mehr im vollem Maße ausgeprägt ist und damit die Trennung von Vegetation- und Nicht-Vegetationsflächen über die spektralen Eigenschaften schwieriger ist. Daher wurden die Ergebnisse in eCognition verbessert. Bei der durchgeführten Segmentierung wurde ein kleiner Scale-Factor verwendet, damit die als Vegetation vorklassifizierten Flächen zu möglichst homogenen Vegetationstypen weiter segmentiert werden konnten. Als Homogenitätskriterien wurden multispektrale Merkmale und ein Ratiokanal (Normalized Difference Vegetation Index; NDVI) sowie die Form berücksichtigt. Mit Hilfe einer Zugehörigkeitsfunktion wurden über den NDVI-Wert Vegetation und Nicht-Vegetation getrennt. Aus diesem Klassifikationsergebnis wurde anschließend mit der klassenrelevanten Zugehörigkeitsfunktion von eCognition der Grünflächenanteil in jedem BTNT berechnet. Fehlerhafte Grenzverläufe der terrestrischen BTNT-Kartierung wurden zuvor visuell korrigiert.

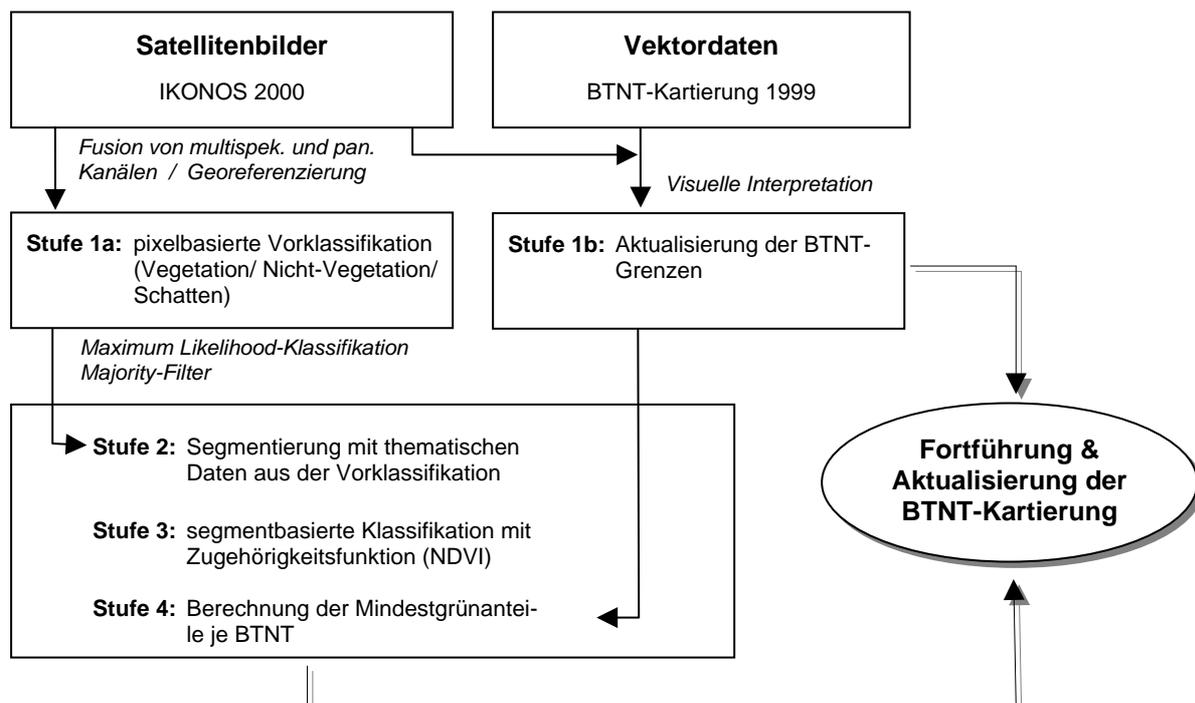


Abb. 3: Darstellung der Methodik

4 Ergebnisse

Die erste Stufe des Verfahrens, die pixelbasierte Klassifikation von Vegetation, Nicht-Vegetation und Schattenbereichen, ist zufrieden stellend durchgeführt worden. Kleinere Fehlklassifikationen konnten in eCognition behoben werden. Ein weiterer kleiner, aber nicht behebbarer Fehler, trat in solchen Bereichen auf, wo Vegetationsflächen direkt an bebaute Flächen angrenzten. Diese Bereiche treten besonders, wie die Abbildung 4 zeigt, an Dachkanten der Hochhäuser in den Großwohnsiedlungen auf. Ursache ist die gröbere Auflösung der multispektralen Kanäle von vier Metern im Vergleich zu dem panchromatischen Kanal mit einem Meter, wodurch die Randbereiche der Häuser die gleiche spektrale Eigenschaft wie die Grünflächen haben.

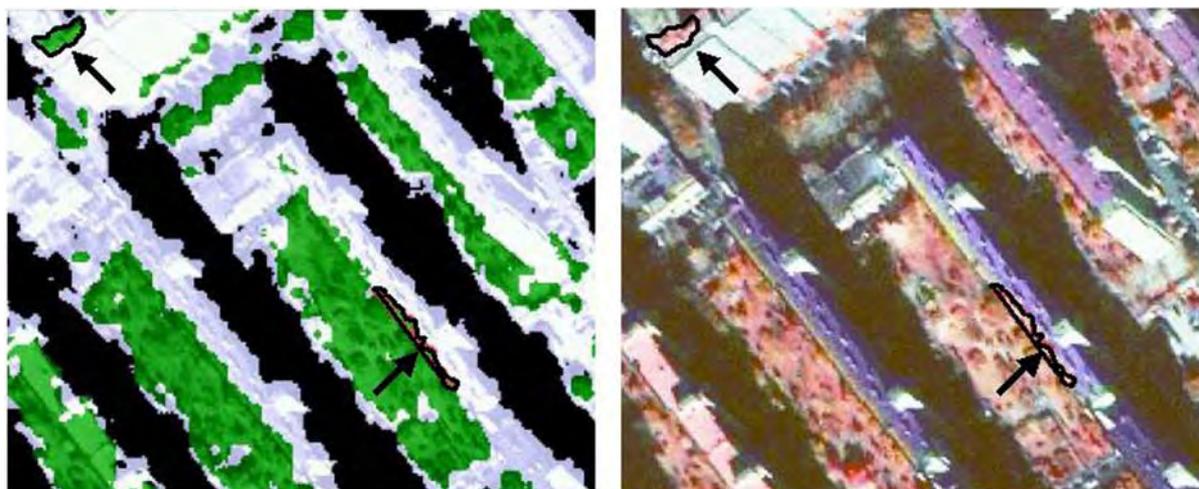


Abb. 4: Beispiel für Fehlklassifikationen von Vegetation

Der Vergleich zwischen den terrestrisch geschätzten und den automatisch berechneten Grünflächenanteilen zeigt, dass mit Hilfe der IKONOS-Daten eine Aktualisierung der BTNT-Kartierung möglich ist (Abb. 5). Obwohl durch Kippungen und Schatten einige Bildbereiche nicht in die Auswertung mit einbezogen und dadurch nur der Mindestgrünflächenanteil errechnet werden konnte, ist ein realitätsnäheres Ergebnis erzielt worden, als es die terrestrischen Schätzungen hervorgebracht haben. Vor allem können deutlich unterschätzte Grünanteile wie z. T. an Straßenzügen erkannt werden. Weiterhin können die Grün- bzw. Parkanlagen korrigiert werden, die pauschal als 100 %ige Vegetationsfläche aufgenommen worden sind. Mit Hilfe des Verfahrens ist eine objektivere Kartierung der Grünflächenanteile möglich. Aus dem Segmentierungsergebnis lässt sich nicht nur der prozentuale Anteil berechnen, sondern auch die Lage und Verteilung der Vegetation innerhalb der Kartiereinheit ableiten. Diese Information kann für Planungsaufgaben mit einbezogen werden.

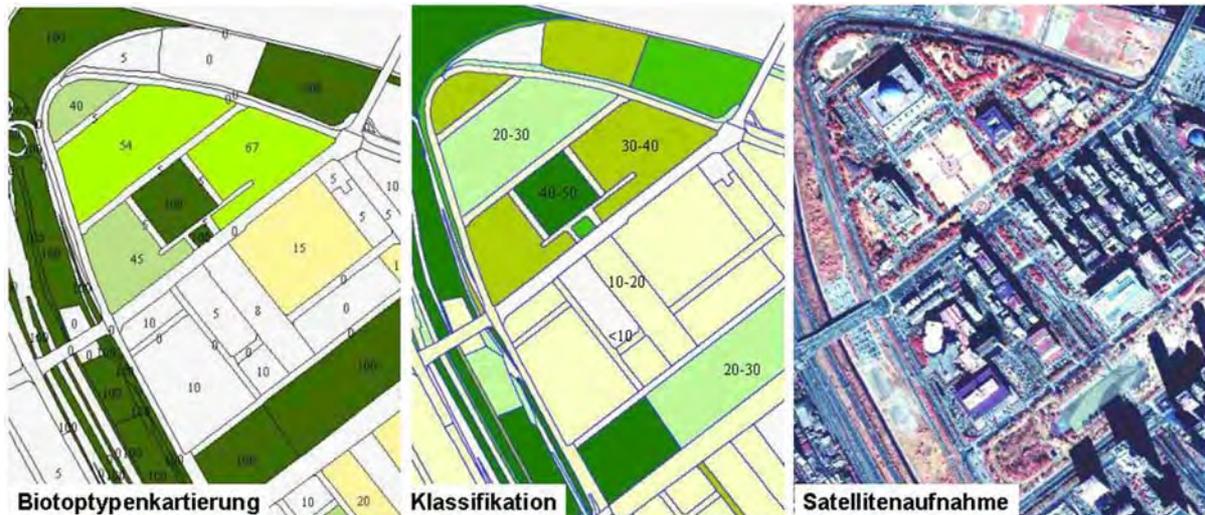


Abb. 5: Vergleich der erfassten Grünanteile

5 Diskussion und Ausblick

Die für die vorliegende Arbeit angeschaffte IKONOS-Szene wurde als CATERRA Geo bezogen. Wegen der Aufnahme mit Off-Nadir-Modus ist die Anwendung dieser Daten problematisch zu bewerten. Die daraus resultierenden Kippungen und Schatten besonders im Bereich der Hochhäuser verdecken Teile der zu untersuchenden Flächen, so dass eine automatisierte Klassifikation in diesen Bereichen nicht möglich war. Auch der Ratiokanal konnte in den sehr dunklen Schattenbereichen keine zusätzlichen Informationen bereitstellen. Ein weiteres Problem, welches jedoch in dem gewählten Untersuchungsgebiet vernachlässigbar war, ist das Problem der Referenzierung der Daten in den reliefreichen Gebieten von Seoul. Dort sind Lagefehler von mehreren 100 Metern aufgetreten. Aufgrund der fehlenden Sensordaten sowie der problematischen Passpunktbeschaffung in militärischen Sperrgebieten konnte der Lagefehler nicht verbessert werden. Die gleichen Phänomene werden von TOUTIN und CHENG (2001) in ihren Ausführungen zu den unterschiedlichen IKONOS-Datentypen beschrieben.

Wie das Beispiel gezeigt hat, konnten durch die hohe geometrische und radiometrische Auflösung der IKONOS-Daten die städtischen Grünflächenanteile relativ gut kartiert werden. Erste Untersuchungen zur Differenzierung der Grünflächen in unterschiedlichen Vegetationsformen ergaben, dass die Anwendung objektbezogener Merkmale wie Objektformen bzw. -größen, Nachbarschafts- und Hierarchiebeziehungen, neben den Grauwertinformationen hierbei sinnvoll sind. Es zeigte sich jedoch bereits, ähnlich wie in der Arbeit von LESER (2002), dass die Suche nach einem möglichst flächendeckend zufrieden stellenden Segmentierungsergebnis äußerst langwierig ist und zum Teil eine unlösbare Aufgabe darstellt.

Eine Möglichkeit, den Auswertungsprozess zu verbessern, kann darin bestehen, zusätzliche thematische Daten zu verwenden. Hierbei ist jedoch das Problem von Fehlsegmentierungen zu erwarten, da zusätzliche Vektordaten aufgrund unterschiedlicher Maßstäbe und Aktualität nicht immer mit den Fernerkundungsdaten vergleichbar sind. Eine nicht lagegenaue Referenzierung verursacht ferner Segmentierungsfehler, da hierdurch Verschiebungen zwischen den Grenzen thematischer Zusatzdaten und den Satellitendaten entstehen. Weniger Probleme und genauere Ergebnisse sind beim Einsatz wirklicher Senkrechtaufnahmen zu erwarten.

Für ein operationales automatisiertes Verfahren zur Erfassung bzw. Aktualisierung der komplexen BTNT-Kartierung ist die Entwicklung robuster, übertragbarer Segmentierungsverfahren noch erforderlich. Es hat sich auch in anderen Untersuchungen gezeigt, dass die Parameter stark vom jeweiligen Bildinhalt abhängig sind und bei direkter Übertragung zu unvollständigen Ergebnissen führen (SEILER et al. 2004). In diesem Zusammenhang ist es vorauszu- sehen, dass QuickBird-Daten mit einer noch höheren geometrischen Auflösung weitere Herausforderungen, aber auch neue Potentiale bieten werden. Bis zur praktischen Einsatzreife der noch zu entwickelnden Verfahren können höchstauflösenden Satellitensensoren in jedem Fall für eine visuelle Vorkartierung und für bestimmte Fragestellungen wie z. B. die hier beschriebene automatisierte Erfassung der Mindestgrünflächenanteile bei der urbanen BTNT-Kartierung eingesetzt werden.

6 Literatur

- BLASCHKE, T., GLÄBER, C. & LANG, S. 2002: Bildverarbeitung in einer integrierten GIS/ Fernerkundungsumgebung –Trends und Konsequenzen. In: Blaschke T. (Hrsg.): Fernerkundung und GIS, Wichmann, Heidelberg, S. 1-8.
- LESER, C., 2002: Operationelle Biotopkartierung mit HRSC-Daten – Probleme und Lösungsansätze. In: Blaschke T. (Hrsg.): Fernerkundung und GIS, Wichmann, Heidelberg, S. 88-97.
- SEILER, U., NEUBERT, M. & MEINEL, G., 2004: Automatisierte Erfassung von Biotop- und Nutzungstypen. Naturschutz und Landschaftsplanung 35 (4), S. 101- 106.
- SEOUL, 2002: Dosisaengtae gaenyum-úi dosigaewhoig-e-úi zeokyong-ul ui-han Seoul-si biotope hyunwhangzosa mit saengtaedosi zosungzichim surip (Richtlinie für die Geländeaufnahme zur Biotoptypenkartierung und für die ökologische Stadtgestaltung Seouls).
- TOUTIN, T., CHENG, P. 2001: Entmystifizierung von IKONOS. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation 3/2001, S. 171-176.

Detektion von potenziellen Industriebrachen mittels Fernerkundungs- und GIS Daten. Das Beispiel Baltimore City, Maryland, USA

ELLEN BANZHAF ¹

Zusammenfassung: Industrielle Brachflächen gehen meist einher mit Boden- und Wasser-verseuchung und stellen ein herausragendes Problem bei der Stadterneuerung dar (U.S. Environmental Protection Agency = EPA-<http://www.epa.gov/swerosps/bf/accomp2.htm>). Diese sehr spezifische Landnutzung soll mit einem objekt-orientierten Klassifikationsansatz erfasst werden. Es wird versucht, Industriebrachen in ihrer spezifischen städtischen Umgebung zu beschreiben, um dann dieser Klasse ihre heterogenen Objekte zuzuweisen, die durch ihre Form, ihre Lage und ihren räumlichen Bezug charakterisiert werden können. Als Untersuchungsgebiet wurde in den USA die Stadt Baltimore, Maryland, ausgewählt. Sie gilt als eines von 16 Aushängeschildern beim Versuch, innerstädtische Industriebrachen in neue Nutzungen zu überführen, weshalb sie von der US amerikanischen Umweltschutzbehörde EPA finanziell besonders unterstützt wird (<http://www.epa.gov/brownfields/showcase.htm>).

1 Zielstellung

1.1 Einleitung

Seit Beginn des neuen Jahrtausends stehen Aufnahmen der Satelliten Ikonos und Quickbird mit einer räumlichen Auflösung im Meterbereich (panchromatisch, 4 Meter im multispektralen Wellenlängenbereich) kommerziell zur Verfügung. Basierten konkrete satellitengestützte Anwendungsmöglichkeiten im Umweltmonitoring bislang auf Analysen im regionalen Maßstab und waren die damit zusammenhängenden Klassifikationen methodisch auf das Pixel als Informationsebene angewiesen, so besteht nun die Anforderung verstärkt darin, unter Einsatz vorhandenem Wissens semantische Objekte abzuleiten.

In der Fachliteratur häufig diskutiert ist die Problematik, die die hohen Auflösungen mit sich bringen, und eine neue Art der Verarbeitung, also verstärkt eine objektbasierte Analyse, erfordern (s. BLASCHKE, 2002). Auch dem hier vorgestellten Ansatz liegt eine objektorientierte Klassifikation zugrunde, die mit dem Softwareprogramm eCognition durchgeführt wurde. Etwas ungewöhnlich ist jedoch die Überlegung, sich nicht nur maßstabsbezogen und methodisch, sondern auch inhaltlich auf eine andere Ebene hin zu bewegen. So soll nicht primär die Landbedeckung, die durchaus in Form eines einzelnen Objektes klassifiziert werden kann, bestimmt werden, sondern eine spezifische Landnutzung, wirtschaftlich zu charakterisieren durch ihre „Nicht“-nutzung, nämlich die der industriellen, städtischen Brache (HERBST, 2003). Zwar gibt es eine Vielzahl von Arbeiten, die sich mit städtischer Landnutzung und deren Ableitung durch Satellitenbilder beschäftigen (BAUER et al. 2001; MESEV, 2003; RAMSEY, 2003; u.v.a.). Zu diesem Thema wurde bislang keine vergleichende wissenschaftliche Fernerkundungs-Untersuchung gefunden, auf die Bezug genommen werden könnte. Deshalb wird ein empirischer Weg beschritten, der Impuls für eine Strategie hin zu einer späteren operativen Verarbeitung sein könnte und sich gegenwärtig noch in einer Prüfungsphase befindet.

¹⁾ UFZ – Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle, D-04318 Leipzig, Permoserstr. 15

Ellen.Banzhaf@ufz.de

ASU, Center for Environmental Studies, Tempe, AZ, 85281, USA - Ellen.Banzhaf@asu.edu

1.2 Städtische Industriebranche als Landnutzung – wie begegnen die USA diesem komplexen Problem?

Die US Umweltschutzbehörde EPA (Environmental Protection Agency) widmet sich seit der Clinton Regierung verstärkt diesem Thema, deren Sachverhalt zuvor in erster Linie vor Gericht ausgetragen wurde, viele Steuergelder verschlang und meist nicht den gewünschten Erfolg einer raschen Revitalisierung mit sich brachte. Die EPA definiert eine städtische Brachfläche als einen leer stehenden oder unzureichend genutzten Grundbesitz, dessen mögliche Wiedernutzbarmachung kompliziert ist aufgrund tatsächlich vorhandener oder potenzieller Umweltverschmutzung. Die Angst vor Haftbarkeit führt beim Besitzer dazu, das Grundstück oft jahrzehntelang ruhen zu lassen, oft auch aus Unkenntnis über die Höhe der Sanierungskosten. Als Konsequenz wurde 1997 das sogenannte „Brownfields Land Recycling Program“ in Kraft gesetzt, bei dem der Staat eine freiwillige Sanierung finanziell stark unterstützt und die juristische Haftung für die Verschmutzung minimiert. EPA geht davon aus, daß es in den Vereinigten Staaten zirka eine halbe Million industrieller Brachen gibt. In die landesweite Statistik können jedoch nur die vom Besitzer zur Umweltsanierung angemeldeten Grundstücke eingehen, da erst mit dieser vereinbarten Anmeldung eine Umweltuntersuchung vor Ort stattfindet und die Fläche als sogenanntes „Brownfield“ deklariert wird. So gibt es unzählige brachliegende Flächen, die nur dann auf ihren Sanierungsbedarf geprüft werden, wenn Interesse eines möglichen Käufers an einem dieser nicht genutzten Grundstücke besteht. Die Wiedernutzbarmachung ist kompliziert, da sie eine weitreichende Spanne umfasst (Sanierungsfinanzierungen, Umfang der Sanierung von Boden, Wasser, Luft, etc.). Bei der Art der Wiedernutzbarmachung ist die Gemeinde oft nachhaltig involviert, legt sie doch fest, ob sich zur Neubelebung des Viertels an die abgeschlossene Sanierung eine erneute wirtschaftliche Nutzung anschließt, sich eine öffentliche Einrichtung auf dem Gelände ansiedelt oder städtisches Grün in dem entsprechenden Viertel von Bedarf sein wird (WORTH, 2002; <http://www.epa.gov/brownfields/about.htm>).

Auch Europa nimmt sich in jüngster Zeit dieser Industrie- und Gewerbebranche verstärkt an: so findet in Siena die 2. internationale Konferenz mit dem Titel „Brownfields 2004“ statt (<http://www.wessex.ac.uk/conferences/2004/brownfields04/index.html>).

Ein wesentlicher Bestandteil des „Brownfields Land Recycling Program“ ist es, eine Inventur der öffentlich bekannten Flächen durchzuführen, in der ökologisch beeinträchtigte, offene, leerstehende oder zu gering genutzte Grundstücke katalogisiert sind. An dieser Stelle ist der Einsatz der Fernerkundung zur Erkennung möglicher derartiger Flächen von grossem Interesse (<http://www.ci.phoenix.az.us/BROWNFLD/brownfld.htm1#A>).

1.3 Satellitenbilddaten und methodischer Ansatz

Dieser Untersuchung liegt eine panchromatische und multispektrale Ikonos Aufnahme vom 02. Oktober 2001 zugrunde. Die Stadt Baltimore gab bei der Firma Space Imaging LLC in Auftrag, die gesamte Stadtfläche an einem einzigen Tag aufzuzeichnen. Dies wurde mittels drei überlappender Flugstreifen realisiert. Die drei Aufnahmestreifen wurden mit Hilfe des „cubic convolution“ Algorithmus orthorektifiziert. Da die geometrische Auflösung hoch genug ist, um einzelne Autos erfassen zu können, war für die visuelle Charakterisierung einer möglichen Industriebranche auch das umliegende Verkehrsaufkommen wichtig. Es sei deshalb darauf verwiesen, dass es sich beim Aufnahmetag um einen Dienstag handelte, und die Überflugszeit am späten Vormittag stattfand.

Als vorbereitender Schritt für eine objektorientierte Klassifikation wurde zunächst ein Vegetationsindex (NDVI) gerechnet und der multispektralen Aufnahme als synthetischer 5. Kanal zugeordnet. Der anschließende Ablauf findet in der Software eCognition statt und gliedert

sich in drei verschiedene Teile, die aufeinander aufbauen. Die Bildsegmentierung wird auf mehreren Ebenen durchgeführt und soll die optimale Unterscheidung der nun anschließenden Klassifikation ermöglichen. Wird auf unterschiedlichen Segmentierungsebenen klassifiziert, so sind diese Ebenen in hierarchischer Art und Weise miteinander verknüpft, wobei die Bildinformation simultan auf allen Ebenen enthalten ist. Der Klassifikationsprozess baut auf einem fuzzy-logic-Ansatz auf, der die Einbindung eines breiten Spektrums verschiedenster Objektmerkmale, wie z.B. Spektralwerte, Form oder Textur, erlaubt. In die Klassifikation kann auch die Objektumgebung eingebunden werden, indem eine Verknüpfung vernetzter Bildobjekte definiert wird (vgl. BAATZ et al., 2000). In den Ablauf können Klassen als „benachbart“ oder „in einer bestimmten Distanz“ zu einer anderen Klasse festgelegt werden. Deshalb führt der fuzzy-logic Ansatz zu einer Charakterisierung von relativ feinen städtischen Landnutzungskategorien (BAUER & STEINNOCHER, 2001).

Die aus der Klassifikation resultierende Information wird nun in ein regelbasiertes System integriert, das auf einer höheren Ebene der Bildanalyse erfolgt. Hier werden klassifizierte Landnutzungsobjekte zu einer semantischen Struktureinheit, in diesem Fall „potenziellen Industriebranchen“, zusammengeführt. Diese Bündelung unterliegt der Annahme, daß potenzielle Industriebranchen eine Landnutzungstypus darstellen, der einem bestimmten Muster folgt. Er besteht beispielsweise aus Gebäuden, Straßen oder Straßenzufahrten, geteerten Parkplätzen und u.U. einem Anteil vernachlässigter Vegetation. Diese Objekte können alle zunächst einzeln klassifiziert und dann zu unterschiedlichen Strukturgruppen zusammengeführt werden.



Abb. 1: Auswahl einiger Testgebiete im Hafengebiet von Baltimore City

1.4 Untersuchungsgebiet

EPA wählte Baltimore 1997 als eine beispielgebende Gemeinde („showcase community“) für städtische Industriebranchen aus. Durch diesen Status erhielt die Stadt besonderen Zugang zu bundesstaatlichen Finanzmitteln, mit denen sie Anreize schaffen konnte und ein Gesetz zur freiwilligen Sanierung verabschiedete („Maryland Voluntary Cleanup Act“). Der Vorzug, zu einer beispielgebenden Gemeinde zu gehören, besteht darin den Umweltschutz zu fördern, die ökonomische Wiedernutzbarmachung voranzutreiben und die innerstädtische Neubele-

bung zu forcieren (<http://www.epa.gov/swerosps/bf/showcase.htm>). Baltimore erlitt einen massiven Bevölkerungsschwund von 11,5 % zwischen 1990 und 2000 von ca. 736.000 auf 650.000 Einwohner. In umgekehrter Richtung verlief das Wachstum im Umland, denn hier war im selben Zeitraum ein Anwachsen um 7.0 % von 2.3 Mio. auf über 2.5 Mio. Menschen zu verzeichnen. Gleichzeitig ändert sich das wirtschaftliche Gesicht der Stadt von einem historisch bedingten Industrieraum hin zu einem Dienstleistungszentrum. Aus diesem Grund unterliegt die Stadt einem raschen Wandel, der in der Zersiedelung des Umlandes und möglichen Konversionsflächen relativ zentral gelegener Flächen resultiert (<http://www.baltimorecity.gov/government/planning/census/index.html>).

2 Bestimmung potenzieller Industriebrachen

2.1 Landnutzungsklassen

Bei der Festlegung der zu bestimmenden Klassen tritt die Überlegung in den Vordergrund, mit welchen Bodenbedeckungs- Klassen (land cover) eine potenzielle Industriebrache relativ gut beschrieben werden kann. Diese Landnutzung muss wegen des fernerkundungsmethodischen Ansatzes auf ihr mögliches räumliches Erscheinungsbild reduziert werden, auch wenn dadurch wesentliche Charakteristika wie Boden- und Wasserverunreinigung unberücksichtigt bleiben. Räumlich beschrieben werden kann diese spezielle Brachfläche anhand verschiedener Objekte wie Gebäude, befestigter Boden, wie z.B. ein Parkplatz, Straßen und Straßenzufahrten, geringe Vegetation. Konzentrieren wir uns auf die Information, die von einem Parkplatz für eine städtische Industriebrache abzuleiten ist, so ist davon auszugehen, dass der zu diesem Grundstück gehörende Parkplatz aufgrund seiner wirtschaftlichen Nichtnutzung entweder gar keine Kraftfahrzeuge oder nur sehr wenige enthält. Obwohl diese Information isoliert betrachtet nicht unumstritten sein mag, ist es unumgänglich sie bei der Charakterisierung hinzuzuziehen. Sie dient als wichtige zusätzliche Stütze zur Beschreibung der heterogenen Fläche.

Auf einer höheren Segmentationsebene wird die Aufnahme klassifiziert in die Obergruppen „Vegetationsbestandene Fläche“ und „Vegetationslose Fläche“. Da die Stadt Baltimore am Patapsco River Ästuar liegt, also an einem Seitenarm der Chesapeake Bucht, und einen großen Hafen besitzt, wird die Klasse „Wasser“ separat bestimmt und im weiteren Ablauf nicht in Unterklassen geteilt. Auf der unteren Segmentationsebene sind zielgerichtete Objektklassen definiert. Über diese gewünschten Klassen hinaus werden weitere Unterscheidungen vorgenommen, die auf das hohe Auflösungsvermögen von Ikonos zurückzuführen sind. So ist das unterschiedliche Oberflächenmaterial von Baukörpern und Straßenbelägen nach ihrer Helligkeit unterschieden. Diese Unterteilung unterstützt zwar das allgemeine Klassifikationsergebnis, trägt aber nicht zu einer besseren Charakterisierung der Industriebrachen bei.

Der Oberklasse „Vegetationsbestandene Fläche“ wird zugeordnet:

- Wohngebiet / einzelne, freistehende Gebäude
- Industrie-, Gewerbegebiet mittlerer Dichte
- Stadtwald / hoher Baumbestand
- Städtisches Grün (Rasen, Park)
- Vernachlässigte Grünfläche

Der Oberklasse „Vegetationslose Fläche“ wird zugeordnet:

- Industrie-, Gewerbegebäude I (helles Dach)
- Industrie-, Gewerbegebäude II (dunkles Dach)
- Industrie-, Gewerbegebäude III (Dach mit gemischter Struktur)

- Industrie-, Gewerbegebiet hoher Dichte
- Parkplatz – ohne Kraftfahrzeuge
- Parkplatz – mit wenigen Kraftfahrzeugen oder Fracht
- Parkplatz – mit vielen Kraftfahrzeugen oder hohem Frachtaufkommen
- Offener Boden



Abb. 2: Klassifikation des oben dargestellten Gebietes. Grautöne stellen Gebäude dar, Rottöne Parkplätze mit wenigen oder keinen KFZ, Olivgrün repräsentiert vernachlässigte Grünfläche, Dunkelgrün steht für Gras.

Zur Beschreibung der einzelnen Klassen können Merkmale unterschiedlichster Zugehörigkeiten gewählt werden. Die Spannweite der Merkmale reicht von Objektmerkmalen, also spektrale Bildinformation, Form, Textur, etc., bis zu Beziehungsmerkmalen zwischen Klassen, wie z.B. das Verhältnis zum Nachbarobjekt, zum Sub- oder Superobjekt. Diese Zugehörigkeitsfunktionen werden für jede Klasse einzeln festgelegt (vgl. BANZHAF & NETZBAND 2004).

2.2 Fuzzy Logic Klassifikation

In der überwachten Klassifikation wird nun jedes segmentierte Objekt unter Einbeziehung aller Zugehörigkeitsfunktionen mit jeder Klassenbeschreibung verglichen. Die in der Unterklasse enthaltenen oder von der Oberklasse „vererbten“ Merkmale erstellen für jedes Objekt einen Zugehörigkeitswert, und entsprechend dem höchsten Wert wird ein Objekt dann einer Klasse zugewiesen. Falls der Zugehörigkeitswert geringer ist, als der vorab definierte Minimalwert, bleibt dieses Bildobjekt nicht klassifiziert. Eine Klassifikation, die auf einer fuzzy Regel beruht, unterscheidet eine Klasse von einer anderen, indem herausgefunden wird, welche Kombination von fuzzy Merkmalen passend ist.

Die durchgeführte Klassifikation hat als Ziel, die einzelnen Klassen abzuleiten, mit denen eine städtische Industriebranche beschrieben werden kann. Aus diesem Grund ist das Ergebnis ein wichtiger Zwischenschritt hin zur zielführenden Landnutzungserfassung. Im nächsten Schritt werden bestimmte Klassen wissensbasiert als strukturelle Gruppen zusammengeführt.

2.3 Industriebrachen als strukturelle Einheiten

Bis zu diesem Arbeitsschritt folgen die Bildobjekte dem Muster der Bildsegmentierung genauso wie die daraus abgeleiteten Klassen (vgl. JOHANSSON 1994). Diese segmentierten und klassifizierten Bildelemente werden nur einer nutzungsbezogenen Struktur zugewiesen. Derartige wissensbasierte Objekte unterliegen keinen Homogenitätskriterien. Die definierten Klassen bilden eine semantische Einheit, auch wenn sie ganz unterschiedlichen Klassenmerkmalen unterliegen. Wie in Kapitel 1.3 beschrieben, wird angenommen, dass sich potenzielle städtische Brachflächen aus verschiedenen Objekten zusammensetzen. Deshalb werden nicht alle klassifizierten Objekte benötigt, um sie in Zielgruppen zu bündeln. Die Gruppen setzen sich aus bestimmten Objekten zusammen, wobei dominante Variationen für die Zielgruppe beispielhaft aufgeführt sind:



Abb. 3: Potenzielle Industriebrachflächen im ausgewählten Gebiet. Es zeigt sich, dass nicht bebaute Testflächen, die in diesem Fall als Parkplatz genutzt werden, nicht zugewiesen werden können.

Potenzielle städtische Brachfläche sind definiert als Variationen unterschiedlicher Nachbarschaften. Beispielsweise grenzt ein Industrie- oder Gewerbegebäude an einen Parkplatz ohne Kraftfahrzeuge oder Fracht sowie an eine vernachlässigte Grünfläche. Ein anderes Beispiel gilt für ein Industrie-, Gewerbegebäude, das direkt benachbart ist mit einem Parkplatz mit nur wenigen Kraftfahrzeugen und einer vernachlässigten Grünfläche.

Zur Erfassung möglicher Brachflächen werden mehrere Zyklen durchlaufen, um die einzelnen Objekte zu unterschiedlichen Gruppen zu bündeln. Bei den Testgebieten sind Industriebrachen dabei, die kein Gebäude enthalten. Diese Flächen sind deutlich schwieriger zu bestimmen. Industriebrachen, die vom Besitzer weitervermietet und z.B. als öffentliche Parkplätze zwischengenutzt werden, sind nicht zu erfassen.

3 Diskussion und Ausblick

Klassifikation und Bündelung in Strukturgruppen liefern visuell zunächst jeweils relativ gute Ergebnisse. Voraussetzungen für eine erfolgreiche Durchführung sind zum einen hoch auflösende Satellitenaufnahmen, wie sie derzeit von Ikonos oder Quickbird verfügbar sind, zum anderen ein objektbasierter Klassifikationsansatz, der hier in der Software eCognition ablaufen konnte.

Es gibt eine Vielzahl an Faktoren, die die Klassifikation, einzelne Schritte und auch das Ergebnis selbst beeinflussen können. Dazu gehört in erste Linie der Aufnahmezeitpunkt. Dieser bedingt nicht nur die phänologische Erfassbarkeit, sondern in diesem Ansatz durch die Abhängigkeit vom Wochentag (Werktag versus Wochenende) und vom Aufnahmezeitpunkt während des Tages (während üblicher Arbeitszeit) auch die Ableitung von tatsächlich vorhandener oder nicht vorhandener ökonomischer Aktivität auf einem Gelände. Zur Überprüfung des Ergebnisses bedarf es verfügbarer Testdaten in Form von Grundstücksflächen. Die oftmals in Excel Tabellen aufgelisteten Hausadressen sind als Punktdaten abgelegt und deshalb unzureichend. Im Hinblick auf die Testgebiete ist die Dokumentation über den geplanten Sanierungsbeginn mit der möglicherweise anschließenden Wiedernutzung zu beachten.

Fehler in der Klassifikation sind vor allem auf die spektrale Übereinstimmung zwischen Gebäudeschatten und dunklen versiegelten Flächen zurückzuführen. Des Weiteren war es oftmals schwierig, städtische Parkanlagen von Wohngebieten zu unterscheiden. Da diese schlechte Trennbarkeit jedoch keine Auswirkungen auf die Zielstellung hatte, wurde die Problematik in dieser Studie nicht weiter verfolgt. In einem ersten Validierungsschritt wurde das Ergebnis visuell mit Orthofotos und Stadtstrukturtypen verglichen. Im abschließenden Schritt werden GIS Daten, die der Öffentlichkeit von der Stadt zur Verfügung gestellt werden, hinzugezogen, um eine quantitative Aussage zu treffen.

Da es sich bei städtischen Industriebrachen und ein Phänomen handelt, das sich über Jahrzehnte hinschleppt, und bei den Gemeinden erst dann bekannt wird, wenn sich der Besitzer dazu entschließt, eine Geländeprüfung und etwaige Sanierung anzumelden, ist eine frühzeitige Detektion solcher potenzieller Gefährdungsflächen in einer Stadt ausgesprochen wünschenswert und gleichzeitig gegenwärtig noch äußerst schwierig. Abschließend werden die Vor- und Nachteile der Untersuchung zum gegenwärtigen Entwicklungsstand aufgeführt:

Vorteile:

- Potenzielle städtische Industrie- und Gewerbebrachen können für eine ganze Stadt flächenhaft ausgewiesen werden.
- Die Strukturbildung kann ständig modifiziert werden, je nach erweiterter zusätzlicher Information über die Lage oder spezifischen Charakteristika der Zielgruppe (falls in einer virtuellen Stadt Industriebrachen meist entlang eines Gebirgszuges oder Flusses liegen, oder falls ihre versiegelte Fläche oft älteres Material aufweist als auf den umgebenden Industrieflächen verwendet wird, etc.).
- Potenziell mögliche Flächen können zur Validierung mit GIS Daten einer Gemeinde verglichen werden.
- Richtig zugewiesene Areale können in Karten eingetragen und von der örtlichen Behörde zur Überprüfung genutzt werden.

Nachteile:

- Satellitenbilder liefern nur eine flächenbezogene Aussage zu einer vielschichtigen und problematischen Landnutzung.
- Hoch auflösende Satellitenbilder sind unabdingbar zur Bearbeitung dieser Fragestellung.

- Die Erfassung ist wissensbasiert und die Zuweisung sehr komplex, d.h. eine einfache direkte Zuweisung ist nicht möglich.
- Bislang ist die Detektion noch nicht operationell durchführbar.
- Testflächen oder zumindest Testgebiete sind für jede Stadt nötig, für die potenzielle Industrieflächen erfasst werden sollen.

4 Literaturverzeichnis

- BAATZ, M. HEYNE, M., HOFMANN, P., LINGENFELDER, I., MIMLER, M., SCHAEPE, A. WEBER, M., WILLHAUCK, G. (2000): eCognition User Guide. München. Definiens AG.
- BANZHAF, E., NETZBAND, M. (2004): Detecting Urban Brownfields by means of High Resolution Satellite Imagery. – ISPRS Proceedings, Commission VII, WG VII/4. Istanbul, 14.-23.7.2004
- BLASCHE, TH. (HG.)(2002): Fernerkundung und GIS. Neue Sensoren – innovative Methoden. – 264 S., Wichmann, Heidelberg.
- BAUER, T., STEINNOCHER, K. (2001): Pre-parcel land use classification in urban areas applying a rule-based technique. – GeoBIT/GIS 6, S. 24-27.
- HERBST, H. (2003): The importance of wastelands as urban wildlife areas - with particular reference to the cities Leipzig and Birmingham. – UFZ-Berichte, Nr. 2. Dissertation.
- JOHANSSON, K. (1994): Segment-based land use classification from Spot satellite data. - Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 60 (1), S. 47-53.
- MESEV, V. (2003): Urban land use uncertainty: Bayesian approaches to urban image classification. – Mesev, V. (Hg.): Remotely Sensed Cities. 1. Aufl. Taylor & Francis, London and New York. S. 207-222.
- RAMSEY, M. S. (2003): Mapping the City Landscape from Space: The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance Radiometer (ASTER) Urban Environmental Monitoring Program. – Heiken, G., Fakundiny, R., Sutter, J. (Hg.): Earth Science in the City. A Reader. American Geophysical Union, Washington, D.C. S. 337-361.
- WORTH, S. J. (2002): The Brownfield Roadmap to Revitalization. – Arizona State University, Tempe, AZ. Magisterarbeit. Unveröffentlicht.

Fusion multi-sensoraler Daten zur Extraktion von Oberflächenkanten

JOCHEN SCHIEWE¹

Zusammenfassung: Dieser Beitrag stellt methodische Entwicklungen zur Extraktion und Klassifizierung von Oberflächenkanten aus multi-sensoralen Fernerkundungsdaten vor. Exemplarisch werden Gebäude- und Dammkanten aus räumlich hoch auflösenden Daten des Systems FALCON der Fa. TopoSys, d.h. den Höhen aus Mehrfachreflexionen eines Laserscanners sowie multi-spektralen Bildern, abgeleitet. Anstelle eines kantenbasierten Vorgehens wird ein Algorithmus zum Regionenwachstum verwendet, welches u.a. eine einfachere, integrierte Betrachtung der Merkmale der Kanten mit denen der begrenzenden Flächen erlaubt.

1 Einleitung

Die zahlreichen und heterogenen Nutzer-Anforderungen haben zur Entwicklung einer Reihe neuer Fernerkundungssensoren mit fortschrittlichen räumlichen, spektralen, radiometrischen und temporalen Auflösungen geführt. Weiterhin wurden Multisensor-Systeme für die simultane Erfassung von Bild- und Höhendaten, insbesondere durch die Kombination von digitalen Kameras mit Laserscannern, entworfen. Für Anwender und Entscheidungsträger fehlen allerdings noch Erfahrungswerte bezüglich der Anwendbarkeit und des Mehrwertes dieser modernen Systeme im Vergleich zum eventuellen, zeitlichen und finanziellen Mehraufwand für ihre konkreten Fragestellungen.

In diesem Zusammenhang stellt die Extraktion von Oberflächenkanten (d.h., von Objekt- oder Geländekanten) aus Fernerkundungsdaten ein wichtiges Anwendungsbeispiel dar. Die bisher erzielten, unbefriedigenden Ergebnisse sind sicherlich auch in der limitierten Qualität der Eingabedaten begründet, z.B. der zu geringen räumlichen Auflösung bzw. der zu geringen Punktdichte sowie der zu geringen geometrischen Genauigkeit in den vertikalen bzw. horizontalen Komponenten. Diese Einschränkungen werden jedoch in naher Zukunft nicht mehr gelten bzw. können bereits jetzt mit hohem technischen Aufwand umgangen werden. Damit kommt nun der Entwicklung geeigneter Auswertelgorithmen für die Extraktion von Oberflächenkanten aus den modernen Fernerkundungsdaten eine große Bedeutung zu.

In diesem Kontext soll unser Beitrag aufzeigen, wie ausgehend von der Verwendung multi-sensoraler Daten – in unserem Beispiel die des FALCON-Systems der Fa. TopoSys (siehe Abschnitt 2) – integrierte Auswerteverfahren einen Mehrwert bei der Extraktion von Oberflächenkanten bewirken können. Eine Besonderheit unseres Verfahrens, das in Abschnitt 3 beschrieben wird, ist die Nutzung der geometrischen Informationen, die die verschiedenen Mehrfachreflexionen des First und Last Echos eines Laserscanners beinhalten. Anstelle eines kantenbasierten Vorgehens wird ein Algorithmus zum Regionenwachstum verwendet, welches u.a. eine einfachere, integrierte Betrachtung der Merkmale der Kanten mit denen der begrenzenden Flächen erlaubt. Die extrahierten Kanten werden noch einer Nachverarbeitung unterzogen (z.B. zur Dilation), wobei hier auch die radiometrischen Informationen aus den Bilddaten des Sensorsystems genutzt werden.

¹ PD Dr.-Ing. Jochen Schiewe, Forschungszentrum für Geoinformatik und Fernerkundung, Hochschule Vechta, Postfach 1553, 49364 Vechta, E-Mail: jschiewe@fzg.uni-vechta.de

2 Multi-sensorale Datenquellen

2.1 Allgemeine Anmerkungen

Die großformatigen, digitalen Kamerasysteme (wie die DMC, ADS 40, HRSC-AX oder Ultracam-D) erfassen zusätzlich zu den spektralen Informationen auch stereoskopische Daten, aus denen durch automatische Matching-Algorithmen Digitale Oberflächen-Modelle abgeleitet werden können. Eine Alternative zur Akquirierung von Höhendaten stellen flugzeuggestützte Laserscanner dar, die in den letzten zehn Jahren aufgrund der gestiegenen Leistungsfähigkeit der GPS- und Inertialmesssysteme zur direkten Orientierung operationelle Reife erhalten haben. Mit der optionalen simultanen Erfassung von Laserscanning- sowie multi-spektralen Bilddaten (wie beim System FALCON oder den Systemkombinationen ALTM/DSS oder ALS 50/ADS 40) werden unter homogenen Aufnahmebedingungen erzielt, zum anderen wird der Umfang ableitbarer Merkmale potenziell erhöht. Einen Überblick über aktuelle Multi-Sensorsysteme gibt SCHIEWE (2004), im weiteren Verlauf dieses Beitrages werden Daten des FALCON-Systems (nächster Abschnitt) verwendet.

2.2 FALCON-System

Im Jahr 2002 brachte die Firma TopoSys GmbH (Ravensburg) das System FALCON auf den Markt, das nicht nur Laserscanning-Höhen, sondern optional dazu auch multi-spektrale Bilddaten simultan erfassen kann (LOHR, 2003). Im weiteren Verlauf dieser Studie wird eine Szene dieses Sensors ausgewertet werden, die die Stadt Memmingen und Umgebung abdeckt.

Der **bildgebende Teil** des Systems besteht aus einem Linienscanner, der Strahlungsenergie in vier Kanälen im sichtbaren und nahen Infrarotbereich mit einer Bodenpixelgröße von 0.5 m und einer radiometrischen Auflösung von 11 bit erfasst. Der **Laserscanner** arbeitet mit einer Glasfaserzeile, die ein paralleles Aufnahmemuster erzeugt. Die resultierenden Höhendaten mit einer Höhengenaugigkeit von ± 0.2 m werden in einem regelmäßigen Raster mit einer Gitterweite von $(0.5 \text{ m})^2$ bzw. $(1.0 \text{ m})^2$ bei einer Streifenbreite von 250 m (für eine Flughöhe von 1000 m) an den Nutzer abgegeben.

Eine wichtige Eigenschaft, die im weiteren Verlauf dieser Studien ausgenutzt werden soll, ist die Fähigkeit zur Aufzeichnung von **Mehrfachreflexionen** des Laserstrahls (LÖFFLER, 2003): Von jedem ausgesendeten Laserpuls werden die jeweiligen tiefsten und höchsten Werte (last und first echo) aufgezeichnet – unter der Voraussetzung, dass diese beiden Echos einen Unterschied von mindestens einer Pulsdauer von 5 ns (entsprechend 1.5 m) aufweisen. Im Durchschnitt wird eine Rasterzelle des abgeleiteten Höhen-Modells durch eine Vielzahl von Laserstrahlen getroffen. Dies führt zur Unterscheidbarkeit der jeweiligen höchsten und tiefsten Werte des first und last echoes (d.h. first echo high = FE-high, last echo low = LE-low, usw.). Als Folge repräsentieren die entsprechenden Höhenmodelle verschiedene Oberflächen: So können FE-high-Höhen schmale, hohe Objekte wie Gebäude und Vegetation darstellen, während schmale Lücken dazwischen verschwinden. Das LE-low-Modell weist die gegensätzlichen Eigenschaften auf. Folglich führt die Differenz (FE-high minus LE-low) zur Repräsentation der (verbreiterten) Gebäude- und Vegetationskanten (Abb. 1).

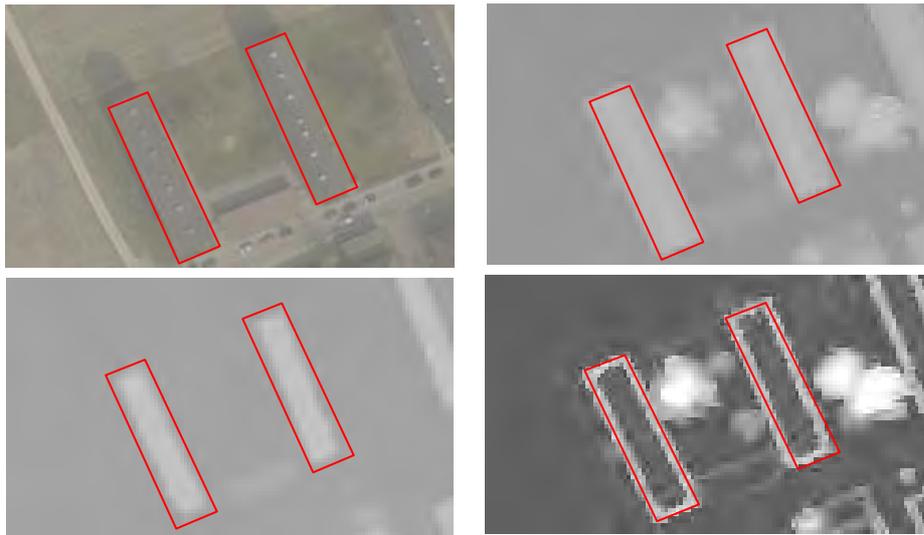


Abb. 1:
 Verschiedene Repräsentationen von Gebäuden durch Mehrfachreflexionen des Lasers:

- Bilddaten (o.l., zu Vergleichszwecken),
- FE-high (o.r., Gebäude zu groß),
- LE-low (u.l., Gebäude zu klein) und
- Differenz FE-high minus LE-low (u.r., breite Gebäudekanten)

3 Extraktion von Oberflächenkanten

3.1 Definitionen

Für die Beschreibung und Interpretation topographischer Oberflächen sind solche (Raum-) Kurven von Interesse, die entweder lokale Maxima (Kammlinien, Wasserscheiden), lokale Minima (Tallinien) oder die Grenze zwischen Flächen mit signifikant unterschiedlichen Gradienten darstellen. Im Folgenden wird der Schwerpunkt auf den letzten Kurventyp, den wir auch als *Oberflächenkanten* bezeichnen, gelegt werden. Diese Teilmenge eines Digitalen Oberflächen-Modells (DOM) beinhaltet die so genannten harten Kanten topographischer Objekte (*Objektkanten*, z.B. von Gebäuden oder Vegetation) sowie die *Geländekanten* (als Teilmenge des Digitalen Gelände-Modells, DGM; z.B. von Deichen oder Dämmen). Oberflächenkanten stellen entweder nur einen abrupten Gefällewechsel dar, oder bilden darüber hinaus auch komplexe Objekte, die aus einer *Unterkante*, einer *Oberkante* sowie einer dazwischen liegenden Fläche (z.B. *Böschungfläche*) bestehen können. Es sollte an dieser Stelle erwähnt werden, dass die generell gebräuchlichen Begriffe „Bruchkante“ oder „Bruchlinie“ aus geomorphologischer Sicht nicht korrekt sind, da sie lediglich spezielle Geländekanten bezeichnen, die durch Bruch oder Verwerfung entstanden sind, nicht aber die Gesamtheit aller Kanten von Interesse repräsentieren (vgl. BRUNNER, 1985).

Ein allgemein anerkanntes Erfassungskriterium für Oberflächenkanten existiert nicht. Insbesondere ist die Bedingung eines signifikant unterschiedlichen Gradienten nicht quantifiziert. So wird im Objektartenkatalog des ATKIS für die Erfassung einer Böschung (und der damit verbundenen Ober- und Unterkanten) lediglich deren Höhe (mit > 3 m bzw. im flachen Gelände mit > 1 m) und Länge (mit > 200 m) definiert, Gradientenwerte werden jedoch nicht genannt.

3.2 Anwendungspotenzial

Oberflächenkanten stellen zusätzliche und wertsteigernde Informationen zu einem Digitalen Höhen-Modell dar. Exemplarische Anwendungen, die solche Kanteninformationen nutzen, sind das Flutmonitoring oder das Fluss- und Abflussmanagement, für die charakteristische Linien für hydrologische und hydraulische Modelle benötigt werden, ferner die Erstellung von 3D-Stadtmodellen oder die Inspektion von Hochspannungsleitungen. Oberflächenkanten

definieren auch die Umrisse der so genannten Reduktionsflächen, die von Digitalen Oberflächen-Modellen ausmaskiert werden müssen, um zu einem geschätzten DGM bzw. einem normalisierten DOM zu gelangen (SCHIEWE, 2003). Schließlich kann die Repräsentation einer Oberfläche durch Kanten zu einer signifikanten Reduktion der Datenmengen bei originär sehr dicht gemessenen bzw. interpolierten Höhen-Modellen führen.

3.3 Bisherige Arbeiten

In der Literatur werden regelmäßig unbefriedigende Ergebnisse im Zusammenhang mit der (semi-)automatischen Extraktion von Oberflächenkanten aus irregulär oder regulär verteilten Höhenpunkten bemängelt (z.B. PETZOLD ET AL., 1999, PFEIFER & STADLER, 2001). Der Hauptgrund hierfür liegt sicherlich in der limitierten Qualität der Eingabedaten bezüglich ihrer räumlichen Auflösung bzw. Punktdichte sowie der geometrischen Genauigkeiten in den vertikalen und horizontalen Komponenten. Andererseits ist zu erwarten, dass diese Limitierungen in der näheren Zukunft aufgehoben werden können, wenn sie nicht bereits schon heute mit einigem technischen Aufwand umgangen werden können. Damit kommt nun der Entwicklung geeigneter Auswertelgorithmen für die Extraktion von Oberflächenkanten aus den modernen Fernerkundungsdaten eine größere Bedeutung zu.

Einer der wesentlichen Beiträge zur automatischen Oberflächenkanten-Extraktion in der Vergangenheit kam von WILD ET AL. (1996), die einen adaptiven, kantenerhaltenden Filter in den Prozess der DHM-Erstellung anwenden, bevor Gradienten-Filter (z.B. Sobel-Filter) zur Extraktion von Kantenpixeln eingesetzt werden. BRÜGELMANN (2000) nutzt die zweite Ableitung der Höhenwerte sowie Hypothesen-Tests, um Regionen von Kantenpunkten zu bestimmen, die dann noch einer Nachbearbeitung unterzogen werden müssen. KRAUS & PFEIFER (2001) beschreiben die Ableitung von 3-dimensionalen Strukturlinien unter Verwendung des Vorwissens aus genäherten Grundrissinformationen der Kanten. Zusammenfassend muss allerdings festgehalten werden, dass diese und andere Algorithmen (z.B. CHAKREYAVANICH, 1991, oder GAISKY, 2000), die einzig auf geometrischen Informationen basieren, nicht mit der manuellen, photogrammetrischen Messung von Oberflächenkanten bezüglich Korrektheit und Vollständigkeit konkurrieren können.

3.4 Beschreibung der Methode

3.4.1 Überblick

Im Gegensatz zu anderen Algorithmen unterscheidet sich der im Folgenden vorgestellte Ansatz zur Fusion multi-sensoraler Daten zur Extraktion von Oberflächenkanten bezüglich der folgenden Aspekte:

- Wir nutzen nicht nur eine einzelne Oberflächen-Repräsentation, sondern die verschiedenen Mehrfachreflexionen des Laserscanning-Systems (siehe Abschnitt 2.2).
- Wir nutzen nicht nur geometrische (d.h. Höhenwerte), sondern auch semantische Informationen, die aus den Bilddaten abgeleitet werden. Dies simuliert den manuellen Digitalisierungsprozess, bei dem simultan auch thematische Informationen über die zugrunde liegenden Objekte genutzt werden und eine Kategorisierung der extrahierten
- ~~Kanten~~ ~~erfolgt~~ kantenbasierten Vorgehens wenden wir einen Algorithmus zum Regionenwachstum an, was eine einfachere, integrierte Betrachtung der Merkmale der Kanten zu den begrenzenden Flächen erlaubt und das Problem der Zusammenführung extrahierter Kantenpixel zu Linien umgeht.

Abb. 2 gibt einen Überblick über den Algorithmus: Die Segmentierung liefert die Grenzlinien, die die Kandidaten für Oberflächenkanten darstellen. Basierend auf den Merkmalsausprägungen dieser Umringlinien sowie der zugehörigen Innenregionen erfolgt die Klassifizierung (z.B. in die Kategorien Gebäudewand oder Damm), die Konvertierung der klassifizierten Kanten in die Vektordomäne sowie eine Nachbearbeitung. Im Folgenden werden diese Schritte detaillierter beschrieben, wobei der Schwerpunkt auf die Extraktion der o.g. Oberflächenkantentypen (Gebäudewände und Dämme) gelegt wird.

3.4.2 Segmentierung

Zumindest für den Fall der Extraktion von Gebäudewänden folgen sowohl die Kantendetektion als auch das Regionenwachstum der selben Philosophie der Abgrenzung stufiger Kanten (PAVLIDIS & LIOW, 1990). Wir verwenden im Folgenden die Erweiterung einer Regionenwachstumsmethode, den *Fractal Net Evolution Approach (FNEA)* des Software-Paketes eCognition (BAATZ & SCHÄPE, 2000). Hiermit wird eine engere Verbindung zwischen den Segmenten und den zugehörigen Grenzlinien geschaffen, sodass für die nachfolgende Klassifikation Ausprägungen beider Merkmalsträger genutzt werden können. Ferner wird das bei kantenbasierten Verfahren inhärente Problem der Verkettung von Kantenpixel umgangen.

Für die Segmentierung verwenden wir – sowohl für die Delineation der Gebäudewände als auch der Dämme – die Tiefstwerte des last echo Laserimpulses (LE-low). Hiermit wird zwar die Lage der Strukturen leicht nach innen versetzt (siehe hierzu Abschnitt 3.4.4), doch werden nur noch die Geländeoberfläche sowie die Gebäude repräsentiert und andere „störende“ Objekte ausmaskiert (im Gegensatz z.B. zu den FE-high-Höhen, siehe Abb. 3).

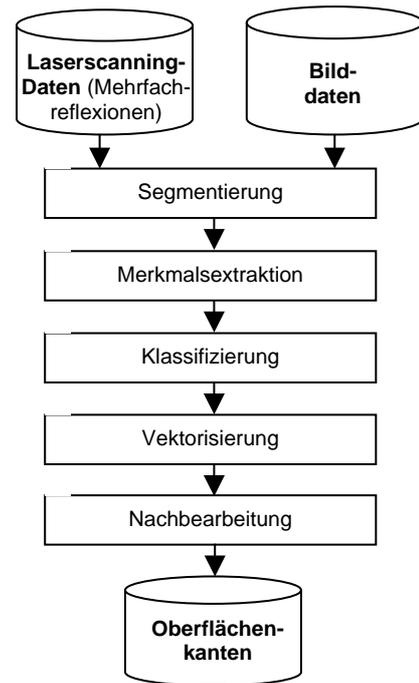
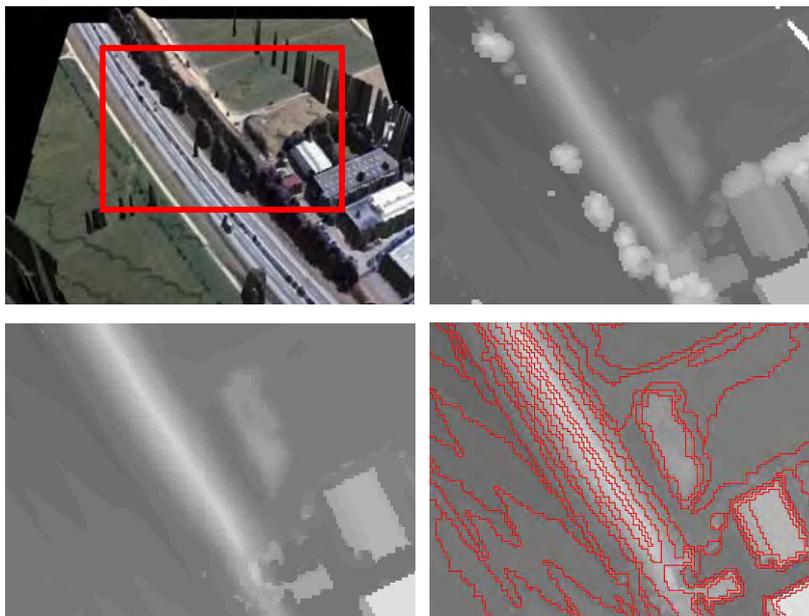


Abb. 2: Schematischer Ablauf der Methode zur Extraktion von Oberflächenkanten

Abb. 3:
Repräsentation eines Damms:

- Perspektivansicht (o.l.),
- FE-high-Höhendaten (o.r.),
- LE-low-Höhendaten (u.l.),
- nach Segmentierung (u.r.)

3.4.3 Klassifizierung

Der Klassifizierungs-Schritt führt nicht nur einen Hypothesentest zur Existenz oder Nicht-Existenz von Oberflächenkanten, sondern gleichzeitig auch eine Kategorisierung in thematische Klassen (hier: Gebäudewände, Dämme) durch. Wir verfolgen einen zweistufigen Prozess, der mit einem Eliminationsverfahren beginnt, wobei mit relativ „moderaten“ Schwellwerten möglichst alle Kanten detektiert werden können. Da hierbei eine recht große Anzahl Fehler 2. Art (Zuweisungsfehler) auftritt, erfolgt im zweiten Schritt deren Reduzierung durch Anwendung eines fuzzy logic-Ansatzes. Dieser ist notwendig, da die Objekt- und Merkmalsbeschreibungen zur weiteren Differenzierung erfahrungsgemäß nur unscharf erfolgen können.

Für die Klassifizierung von Segmenten, die (zumindest teilweise) durch **Gebäudewände** umringt sind, werden die Merkmale Mindestfläche, Höhendifferenz zu niedrigeren Nachbarn, Normalisierter Differenzen-Vegetations-Index (NDVI), Standardabweichung der Höhen sowie Rechtwinkligkeit eingeführt. Weitere Details zum Ablauf gibt SCHIEWE (2004). Die Klassifizierung der **Dämme** beginnt mit der Detektion der Böschungsflächen über die Merkmale Mindestfläche, Krümmung, Verhältnis Länge zu Breite, Linearität der Kanten, Objekthöhe und spektrale Textur. Es folgt die Bestimmung der zugehörigen Kanten durch Betrachtung der an den Längsseiten benachbarten Segmente: Ein Wechsel des Vorzeichens in der Spannweite zeigt eine Kante an, die absolute DOM-Höhe ermöglicht die Unterscheidung zwischen Ober- und Unterkante.

3.4.4 Nachbearbeitung

Nach der **Vektorisierung** der als Oberflächenkanten klassifizierten Linien muss das Problem behandelt werden, dass ihre Ableitung auf den LE-low-Reflexionen basiert und die erhöhten Objekte zu klein im Vergleich zur realen Größe repräsentiert werden (siehe Abb. 1 und 3). Dies macht eine **Dilation** notwendig. Im Falle der Gebäudekanten erfolgt diese auf Basis der multi-spektralen Bilddaten, die einer Pufferung der klassifizierten Kanten in Richtung der außen dazu liegenden Bildkanten, die ebenfalls durch eine Segmentierung abgeleitet wurden, entspricht. Zur Abschätzung des Pufferabstandes wird für jeden Vertex der klassifizierten Kanten die geringste Distanz zur Bildkante bestimmt und das arithmetische Mittel (aller Werte kleiner als 1.5 Pixel) gebildet. Die Pufferoperation ergibt nach Auflösung der Zwischenlinien die verschobenen, klassifizierten Gebäudekanten. Für die Ober- und Unterkanten der Deiche bieten die multi-spektralen Bilddaten keine Hilfe zur exakten Lokalisierung (siehe auch Abb. 3). Daher erfolgt hier eine grundsätzliche Parallelverschiebung um ein halbes Pixel nach außen. Abschließend findet für alle klassifizierten Kanten eine **Glättung** unter Verwendung des Douglas-Peucker-Algorithmus statt.

3.5 Erste empirische Ergebnisse

Die Klassifizierungsgüte der extrahierten Oberflächenkanten wurde durch einen Vergleich mit einer visuellen Interpretation der abgeleiteten Segmente bestimmt und über die Fehler 1. und 2. Art durch den Koeffizienten

$$C = 1 - \frac{\text{Fehler 1. Art} + \text{Fehler 2. Art}}{\text{Gesamte Pixelanzahl in Klasse}}$$

ausgedrückt. Je höher C (mit dem Maximum bei +1.0), desto besser ist die gesamte Güte zu bewerten.

Während für die Extraktion der Dammkanten zum Zeitpunkt der Abgabe dieses Beitrages noch keine umfassenden Ergebnisse vorlagen, wurde für die Klassifizierungsgüte der Gebäudekanten ein Koeffizient C von 0.92 ermittelt. Die verbleibenden Auslassungsfehler (4.7% aller Gebäudekanten wurden nicht erkannt) sind hauptsächlich auf Segmentierungsprobleme zurückzuführen. Nahezu alle Zuweisungsfehler treten am Szenenrand auf, sodass durch die Einführung zusätzlichen Wissens der Wert für C sogar auf 0.97 hätte gesteigert werden können. Ferner muss angemerkt werden, dass die Erkennung von Gebäuden aus den FALCON-Daten grundsätzlich mit einer noch höheren Güte erfolgen kann, wenn die Bilddaten im Sommer (und nicht wie im Beispieldatensatz im März) aufgenommen worden wären und somit der NDVI ein wertvolleres Merkmal dargestellt hätte.

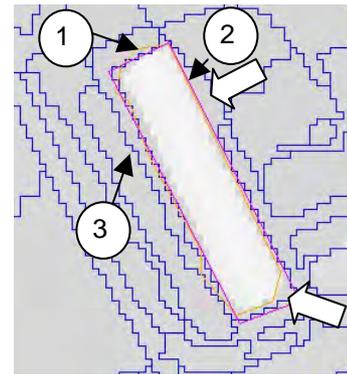


Abb. 4: Vergleich der klassifizierten Kante („1“, orange) mit manuell digitalisierter Kante („2“, rot) und zahlreichen Bildkanten („3“, blau), überlagert auf LE-low-Höhendaten

Abb. 4 gibt ein typisches Beispiel für die Notwendigkeit und Effizienz der Nachbearbeitung. Hierbei wird auch deutlich, dass die Höhen- und nicht die Bilddaten (mit den inhärenten Verdeckungs- und Schattenproblemen) zur ursprünglichen Kantenextraktion (bzw. Segmentierung) zu wählen sind. Die verbleibenden Fehler zwischen der verschobenen, geglätteten Kante zur manuell digitalisierten Linie sind hauptsächlich auf Mängel der Eingabedaten sowie der Segmentierung zurückzuführen. Unabhängig davon sind weitere und komplexe Nachbearbeitungsoperationen sicherlich in der Lage, die Klassifizierungsgüte weiter zu verbessern.

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Zentrales Ziel dieses Beitrages war die Vorstellung einer Methode zur Extraktion und Klassifizierung von Oberflächenkanten (hier: Gebäude- und Dammkanten) durch eine Fusion von Merkmalen aus multi-sensoralen Fernerkundungsdaten.

Erste Ergebnisse für die Extraktion von Gebäudekanten zeigen, dass im Gegensatz zur mono-sensoralen Datennutzung die simultane Verwendung von geometrischen und spektralen Merkmalen die Güte der Delineation und Klassifizierung erhöhen kann. Insbesondere die Verwendung der Laser-Mehrfachreflexionen erweist sich als sehr vorteilhaft. Der Mehrwert der regionenbasierten Strategie im Gegensatz zum kantenbasierten Vorgehen ist noch quantitativ nachzuweisen.

Es bleibt festzuhalten, dass immer noch einige Imperfektionen auftreten, die hauptsächlich auf die Güte der Eingabedaten (z.B. zu geringe Punktdichte der Laserscanning-Höhen) sowie den Aufnahmezeitpunkt, der zu wenig aussagekräftigen NDVI-Werten führt, zurückzuführen sind. Zukünftige Arbeiten werden die Verbesserung einiger methodischer Komponenten betreffen. Hierzu gehört die Nutzung eines erweiterten, multi-skaligen Segmentierungsansatzes (siehe auch SCHIEWE, 2003) oder die Weiterentwicklung des Matching zwischen Höhen- und Bildkanten. Ferner wird der Ansatz auf die Extraktion weiterer Arten von Oberflächenkanten ausgeweitet und validiert werden müssen.

5 Danksagungen

Wir danken der TopoSys GmbH für die Bereitstellung der FALCON-Daten.

6 Literaturverzeichnis

- BAATZ, M. & SCHÄPE, A., 2000: Multiresolution segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: Strobl, J., Blaschke, T. & Griesebner, G. (Hrsg.): *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII*, Wichmann, S. 24-29.
- BRÜGELMANN, R., 2000: Automatic breakline detection from air-borne laser range data. In: *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (Amsterdam)*, 33(B3), S. 109-116.
- BRUNNER, K., 1986: Bruchkante oder Geländekante? *Bildmessung und Luftbildwesen*, 54(3): S. 132.
- CHAKREYAVANICH, U., 1991: Regular Grid DEM Data Compression by Using Zero-Crossings: The Automatic Breakline Detection method. PhD these (Ohio State University), Report OSU-DGSS, Nr. 412., 90 S.
- GAISKY, D., 2000: Geomorphologic improvement of DTMs especially as derived from laser scanner data. In: *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (Ljubljana)*, 32(6W8).
- KRAUS, K. & PFEIFER, N., 2001: Advanced DTM Generation from Lidar Data. In: *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (Annapolis, Maryland)*, 34(3/W4), S. 23-30.
- LÖFFLER, G., 2003: Aspects of raster DEM data derived from laser measurements. In: *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (Dresden)*, 34(3/W13).
- LOHR, U., 2003: Precise LIDAR DEM and True Ortho Photos. In: Fritsch, D. (Hrsg.): *Photogrammetric Week '03*, Wichmann, S. 111-116.
- PAVLIDIS, T. & LIOW, Y.-T., 1990: Integrating Region Growing and Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12(3): S. 225-233.
- PETZOLD, B., REISS, P. & STÖSSEL, W., 1999: Laser scanning – surveying and mapping agencies are using a new technique for the derivation of digital terrain models. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54: S. 95-104.
- PFEIFER, N. & STADLER, P., 2001: Derivation of digital terrain models in the SCOP++ environment. *Proceedings OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models (Stockholm)*.
- SCHIEWE, J., 2003: Integration of multi-sensor data for land-scape modeling using region-based approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57 (5-6): S. 371-379.
- SCHIEWE, J., 2004: Status and future perspectives of the application potential of digital airborne sensor systems. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation (in Review)*.
- WILD, D., KRZYTEK, P. & MADANI, M., 1996: Automatic breakline detection using an edge preserving filter. In: *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (Wien)*, 31(B3): S. 946-952.

Anwendung von GIS und Auswertung von Fernerkundungsdaten zur Bestimmung geeigneter Flächen für Wasserkonzentrationstechniken in Syrien

Annette Oberle¹

Zusammenfassung: LANDSAT TM 5 Daten wurden innerhalb eines Modells der Entscheidungsfindung (Decision systems) ausgewertet, um geeignete Flächen für Water Harvesting bzw. Wasserkonzentrationsanlagen im zentralen Bereich von Syrien auszuweisen. Diese semi-ariden Gebiete zeichnen sich durch einen nur geringen jährlichen Niederschlag von 100 bis 200 mm aus und sind durch die intensive Weidewirtschaft stark übernutzt. Der Abfluss aus den meist heftigen Regenfällen während der Winterregenzeit versickert unkontrolliert. Wasserkonzentrationstechniken erlauben eine Nutzung dieser Wasserressource. Um das Abflussgeschehen im Untersuchungsgebiet zu charakterisieren, wurden klimatische Faktoren (Regenmenge, Regenfallintensität), topographische Faktoren (Hangneigung), die Bodencharakteristika (Bodenfeuchte, Steinigkeit) und die Landnutzung analysiert. Die Landnutzung wurde über die spektrale Klassifizierung von LANDSAT TM 5 Daten, aufgenommen während der Winterregenzeit, erfasst. Hierbei wurde der Maximum Likelihood Algorithmus angewandt. Die Bodenfeuchte wurde über den Tasseled Cap Ansatz, einer Hauptkomponentenanalyse der LANDSAT TM 5 Daten, bewertet. Die Hangneigung wurde über ein digitales Geländemodell ermittelt. Die Parameter des Abflussgeschehens wurden als Datenebenen in ein Geoinformationssystem eingebunden. Über die Indexmethode wurde das Abflusspotential des Untersuchungsgebietes bestimmt, wobei den verschiedenen Datenebenen unterschiedliche Gewichtungen gemäß ihres Einflusses auf das Abflussgeschehen zugeteilt wurden. Die Datenebenen umfassten die Hangneigung, Bodentextur, Pflanzendecke, Steinigkeit der Bodenoberfläche, den Feuchtindex aus der Tasseled Cap Analyse und der Länge der Abflusswege, die mithilfe Satellitenbildes digitalisiert wurden. Um die Eignung des Gebietes für verschiedene Wasserkonzentrationstechniken zu ermitteln, wurde ein Modell der Entscheidungsfindung angewendet (Decision process). Hierbei handelt es sich um den Analytischen Hierarchischen Prozess (AHP: Analytical Hierarchical Process), der eine Gewichtung hinsichtlich der Präferenz von Alternativen der einzelnen Kriterien, die in der Entscheidungsfindung wichtig sind, erlaubt. Ergebnis dieser Analyse sind Karten potentieller Gebiete, die geeignet für bestimmte Wasserkonzentrationstechniken, wie z.B. Microcatchment-Anlagen, sind.

1 Einführung

Bei dem Untersuchungsgebiet (Abb.1) handelt es sich um eine Region im zentralen dünnbesiedelten Bereich von Syrien, westlich der Nord-Süd verlaufenden Autobahn zwischen Damaskus, Homs und Aleppo. Das Gebiet ist durch flaches hügeliges Gelände gekennzeichnet, durchschnitten von den vorwiegend aus Kalksteinen aufgebauten

¹ Dipl.-Geol. Annette Oberle, Hydrag, Griesbachstr. 10, 76185 Karlsruhe, e-mail: oberle@hydrag.de

Gebirgsketten der Nördlichen und Südlichen Palmyriden, die sich bis zu einer Höhe von 1000 bis 1200 m ü. dem Meeresspiegel erheben. Die Infrastruktur des Gebietes ist stark unterentwickelt, es gibt lediglich asphaltierte Verbindungsstraßen zwischen Homs, Damaskus und dem touristisch interessanten Tadmor.

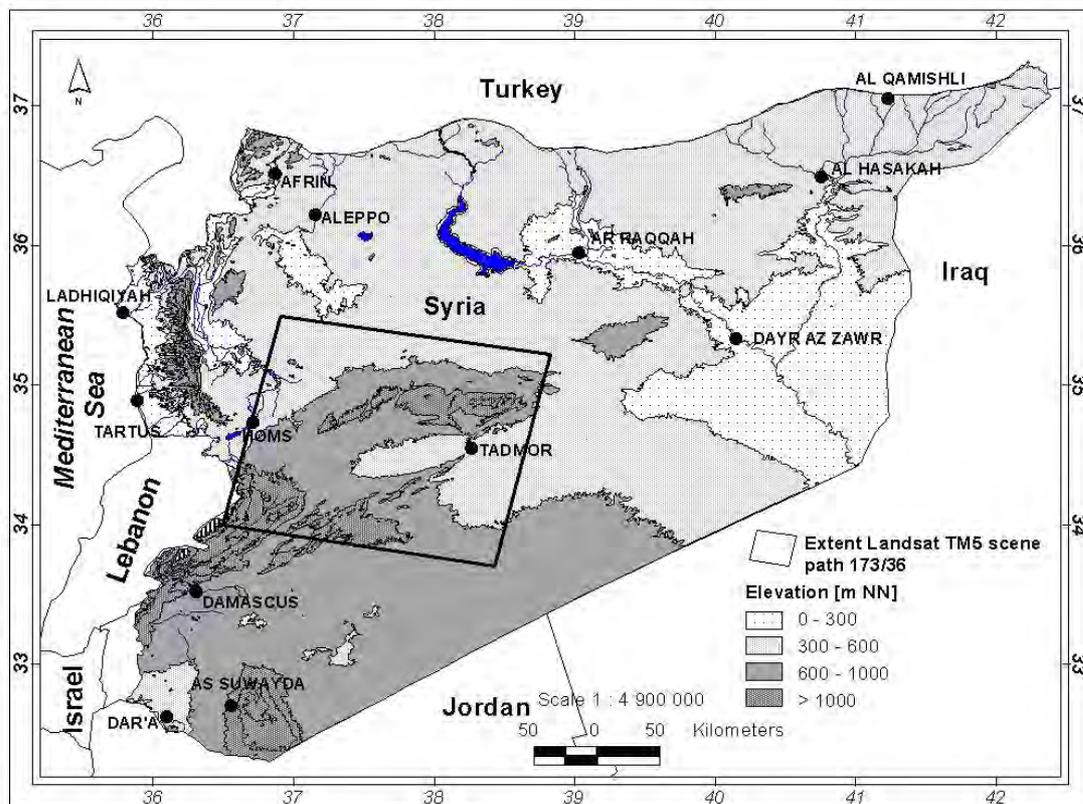


Abb.1 : Lage des Untersuchungsgebietes

Das Untersuchungsgebiet ist durch mediterranes Klima gekennzeichnet mit einer Winterregenzeit zwischen November und April, wobei die jährliche Niederschlagsmenge lediglich 100 bis 200 mm (METEOROLOGISCHES DEPARTMENT, S.A.R., 1996) umfasst. Die potentielle Evaporation nach Penman-Monteith beträgt um 1600 bis 2000 mm pro Jahr (OBERLE, 2004). Das Land wird vorwiegend als Weideland für Schafe genutzt, wobei es allerdings in den letzten Jahren durch die intensive Bewirtschaftung zu einer starken Degradation der Vegetation gekommen ist. Fossile Grundwasservorkommen, die teilweise in den Oasen wie Tadmor zu Tage treten, werden zur Bewässerung von einzelnen Weizen-, Gerstenfeldern und Oliven- und Dattelpalmpflanzungen genutzt.

Das meiste Niederschlagswasser, das in kurzen heftigen Regenschauern erfolgt, versickert meist unkontrolliert in den vorwiegend trockenen Flusstälern (Wadis). Eine Nutzung dieser Resource ermöglichen Water Harvesting- bzw. Wasserkonzentrationstechniken. Diese Techniken bildeten das Rückgrat der Landwirtschaft früherer Hochkulturen in semi-ariden Gebieten (PRINZ, 1996). Flutwasserkonzentrationstechniken und Microcatchment-Anlagen sind Beispiele dieser Techniken. Sie unterscheiden sich vor allem im unterschiedlichen Verhältnis zwischen dem Einzugsgebiet (catchment), in dem Wasser aufgefangen wird, und dem bepflanzten Bereich, auf den das Wasser geleitet wird. Bei Flutwasserkonzentra-

tionsanlagen beträgt dieses Verhältnis zwischen Einzugsgebiet und bepflanzter Fläche bis zu 10 000 : 1 bzw. 100 : 1, bei Microcatchments lediglich 1 : 1 bis 25 : 1 (PRINZ, 1996).

Um nun geeignete Flächen für diese Techniken zu ermitteln, müssen einerseits die verschiedenen Einflussfaktoren, die das Abflussgeschehen in dem semi-ariden Untersuchungsgebiet charakterisieren, und die für Wasserkonzentrations- und Abflusskonzentrations-techniken speziellen Faktoren wie z.B. Hangneigung erfasst werden. Da es sich um ein unzugängliches und infrastrukturelles schwaches Gebiet handelt, bietet sich moderne Techniken wie Fernerkundungsmethoden an.

2 Methodik

Da Geographische Informationssystem (GIS) die Möglichkeit sowohl der Datenerhebung, der Analyse als auch der Bewertung (BÄHR, 1998) bieten, wurden die relevanten Daten in ein GIS eingebunden. Am wichtigsten beim Entscheidungsprozess bezüglich Wasserkonzentrations- und Abflusskonzentrations-techniken, ist das Abflusspotential im Untersuchungsgebiet. Da außer täglichen Niederschlagswerten keine Daten über Niederschlagsintensitäten oder Abflussereignissen aus dem Untersuchungsgebiet vorlagen, wurden das Abflusspotential qualitativ anhand der Einflussfaktoren bewertet. Hierbei wurden die folgenden relevante Faktoren, die bei Abflussereignissen in semi-ariden Gebieten eine Rolle spielen, ermittelt:

- Hangneigung
- Bodentextur
- Vegetationsbedeckung
- Steinigkeit der Bödenoberfläche
- Bodenfeuchte
- Abflusslänge

Mithilfe der Indexmethode wurde den verschiedenen Faktoren einzelne Datenebenen zugeordnet. Entsprechend ihrer Bedeutung wurden ihnen Gewichtungen zugeschrieben. Daten bezüglich der Vegetationsbedeckung und der Bodenfeuchte wurden aus der Auswertung von Landsat TM 5 Bildern mit Aufnahmedaten aus der Regenzeit und der Trockenzeit herangezogen. Der Thematic Mapper Sensor findet aufgrund seiner spektralen Breite von insgesamt 7 Kanälen (3 VIS, 1 NIR, 2 SWIR, 1 THIR) ein breites Einsatzgebiet, vor allem im Bereich der Landnutzungsklassifizierung. Die Landnutzung bzw. die Oberflächenbedeckung im Untersuchungsgebiet, die Daten zur Charakterisierung der Vegetationsbedeckung bzw. Steinigkeit der Bodenoberfläche lieferte, wurde über die überwachte Klassifikation unter Anwendung des Maximum Likelihood Algorithmus ermittelt. Zudem wurden die Fernerkundungsdaten bei der Ermittlung der Bodenfeuchte verwendet, wobei der Tasseled Cap Ansatz benutzt wurde. Dieser diente ursprünglich der Charakterisierung des Reifegrades von Getreide. Diese Hauptkomponentenanalyse basiert auf der Erkennung einer dreieckförmigen Punktwolke im Merkmalsraum von Band 2 und 4 des Landsat MSS Sensors (SCHOWENGERDT, 1997). Die Abflusslänge wurde über die visuelle Ermittlung von Abflussrinnen auf den Satellitenbildern ermittelt.

Um nun geeignete Flächen für Flutwasserkonzentrationsanlagen oder Microcatchment-anlagen zu finden, wurde eine Methode der Entscheidungsfindung benutzt. Der Analytische Hierarchische Prozess (AHP) wird häufig angewendet, um komplexen Entscheidungsprozessen Rechnung zu tragen (SAATY, 1980). Hierbei wird der Entscheidungsprozess in unterschiedliche Ebenen aufgeteilt, die oberste Ebene umfasst das Ziel, darunter folgen die Kriterien der Entscheidung. Diese Kriterien umfassen verschiedene Alternativen, die hinsichtlich ihrer Präferenz paarweise gewichtet werden. Dabei wird diese Präferenz gewichtet auf einer Skala von 1 bis 9, wobei 1 die Gleichwertigkeit der Wertepaare ausdrückt und 9 eine absolute Bevorzugung der einen Alternative gegenüber der anderen vorweist. Die Paare werden nun auf jedem Niveau verglichen und ausgedrückt in relativer Gewichtung. Der Eigenvektor wird dann über die Multiplikation aller Faktoren in einer Reihe und dem Ziehen der n-ten Wurzel ($n = \text{Anzahl der Elemente in einer Reihe}$) berechnet. Die relativen Gewichtungen hinsichtlich der Bedeutung werden über die Division jedes Eigenvektor über die Summe aller Eigenvektoren berechnet. Die verschiedenen Ebenen innerhalb der Entscheidungshierarchie werden linear kombiniert. Abb.2 zeigt das hierarchische Entscheidungsmodell zur Bestimmung geeigneter Flächen für Microcatchment-Techniken.

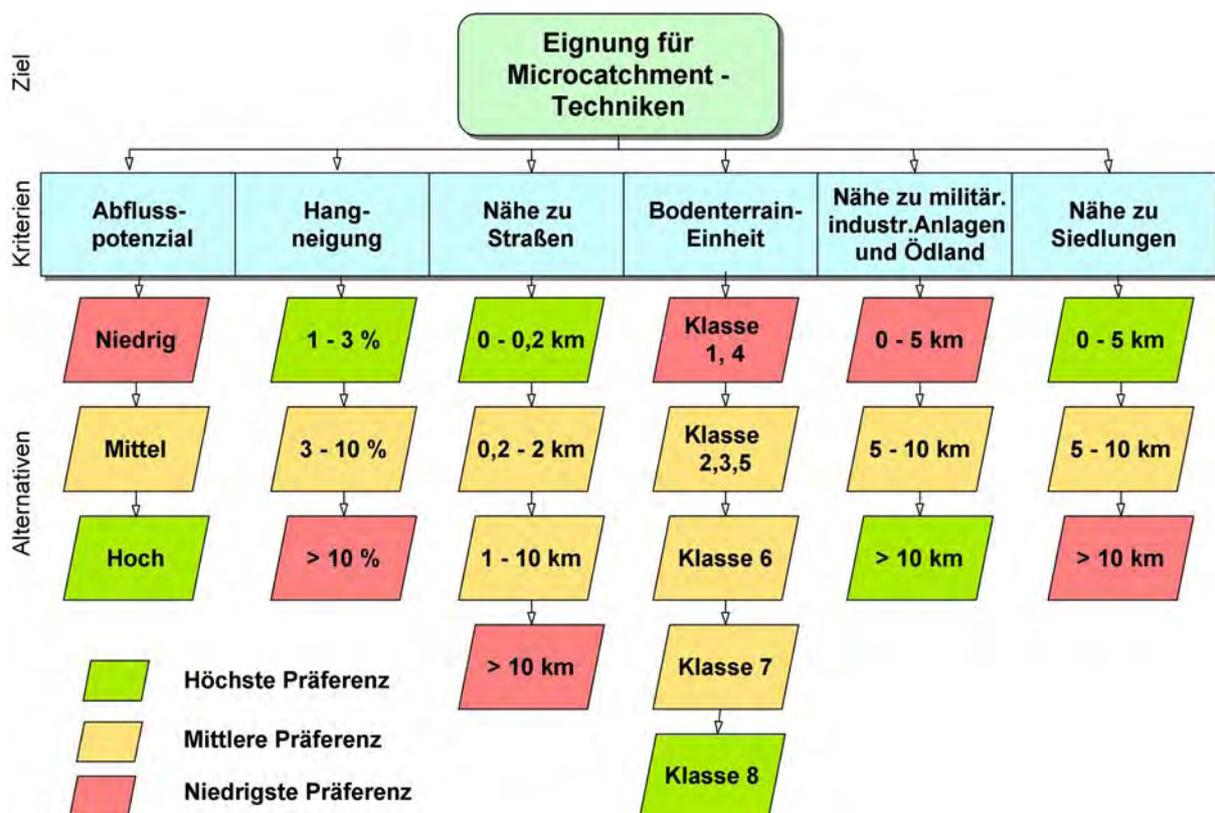


Abb. 2: Entscheidungsmodell zur Bestimmung geeigneter Flächen für Microcatchmenttechniken

3 Datenanalyse

Die einzelnen Faktoren, die zum Abflusspotential beitragen, wurden in ein GIS unter Verwendung von ArcView, Version 3.2 (ESRI, 1995) eingebunden. Die Hangneigung

beispielsweise wurde über ein Geländemodell ermittelt. Hierzu wurden die Höhenlinien topographischer Karten im Maßstab 1:100 000 digitalisiert und anhand der TOPOGRID-Funktion von ArcInfo (ESRI, 1998) das gleichmässig gerasterte Geländemodell berechnet. Die Interpolation der Höhe zwischen den Höhenlinien basiert hierbei auf der Identifizierung der Linie des stärksten Neigung. Punkte der maximalen Ablenkung werden bestimmt, da sie Abflussrinnen und -wege repräsentieren. Der Algorithmus basiert auf einem iterativ finiten Differenzeninterpolation, bei der Bereiche des lokalen Maximums jeder Höhenlinie bestimmt werden. Ein „thin plate spline“ Algorithmus erlaubt die Einbeziehung von Höhenrücken und Abflussrinnen. Die Hangneigung wurde schliesslich innerhalb von ArcView (ESRI, 1995) bestimmt. Das Höhenmodell weist zu über 60 % flache Hangneigungen von 0 – 1% und zu mehr als 15 % Hangneigungen zwischen 2 und 3 %. Nur im Bereich der Höhenrücken der Südlichen Palmyriden treten höhere Hangneigungen auf.

Im Untersuchungsgebiet kommen vorwiegend aride, nur geringentwickelte Böden, die sogenannte Aridisols (Cambiorhids und Calciorhids) und Entisols (Torriorrhents) nach der USDA Bodenklassifikation vor. Die Böden weisen einen hohen Karbonatanteil, einen erhöhten Anteil an Steinen und Geröll und nur wenig organisches Material auf (< 1,4 %). Es handelt sich zumeist um Lehme, wobei Böden in flacheren Wadis (Trockentälern) häufig höhere Tonanteile aufweisen. Untersuchungen bezüglich der Bodenaggregate zeigte, dass viele Böden mit einer Kruste bedeckt sind, die zu einem erhöhten Abfluss führt.

Zur Bestimmung der Bodenfeuchte und der Oberflächenbedeckung bzw. der Landnutzung standen Satellitenaufnahmen aus der Trockenzeit vom 10.10.1993 und 25.7.1994 und Regenzeit vom 4.4.1994 und 7.4.1995 zur Verfügung (Abb.1). Bei der Anwendung des Tasseled Cap Ansatzes zur Ermittlung des Feuchteindex werden die digitalen Grauwerte der einzelnen Kanäle mit einer festgelegten Matrix multipliziert (SCHWOWENGERDT, 1997). Die erste resultierende Komponente beinhaltet die Bodenelligkeit, die Achse orthogonal dazu die Vegetationskomponente und die dritte den Feuchteindex. Bei den Aufnahmen, die während der Regenzeit im April 1994 und 1995 entstanden, zeigen sich deutliche erhöhte Feuchtigkeitsbereiche im Bereich der Abflussrinnen in den Wadis. Diese Feuchtigkeit war in der Aufnahme vom April 1995 noch deutlich erkennbar, obwohl die letzten Regenfälle, die aufgezeichnet wurden von meteorologischen Stationen (METEOROLOGISCHES DEPARTMENT, S.A.R. 1996) im Gebiet 5 bis 6 Tage zurücklagen.

Vor der spektralen Analyse wurden die Satellitenbilder hinsichtlich der Atmosphäre korrigiert. Hierbei wurde die dark – object subtraction Methode durchgeführt (CHAVEZ, 1988). Die Methode basiert auf der Annahme, dass es in jeden Bild Bereiche von totaler Dunkelheit gibt. Hierzu wurden Bereiche mit basaltischen Gesteinen genommen und das Modell einer klaren Atmosphäre angenommen. Die Szenen der anderen Aufnahmezeitpunkte wurden entsprechend dazu kalibriert.

Um die Daten der Landnutzungsklassifizierung auch innerhalb des Geographischen Informationssystems nutzen zu können, wurden sie überführt in das Universal Transverse Mercator System (UTM), das weltweit angewendet wird. Die notwendigen Passpunkte im Gelände wurden über das Global Positioning System bestimmt. Bei der Bestimmung der Oberflächenbedeckungs bzw. der Landnutzungsklassen wurde eine überwachte Klassifizie-

ung angewendet, wobei der Maximum Likelihood Algorithmus benutzt wurde. Im Gelände wurden etwa 90 Trainingsgebiete bestimmt, deren gültige Statistiken auf das gesamte Bild angewendet zu einer Unterscheidung von 13 Klassen führten (Abb.3).

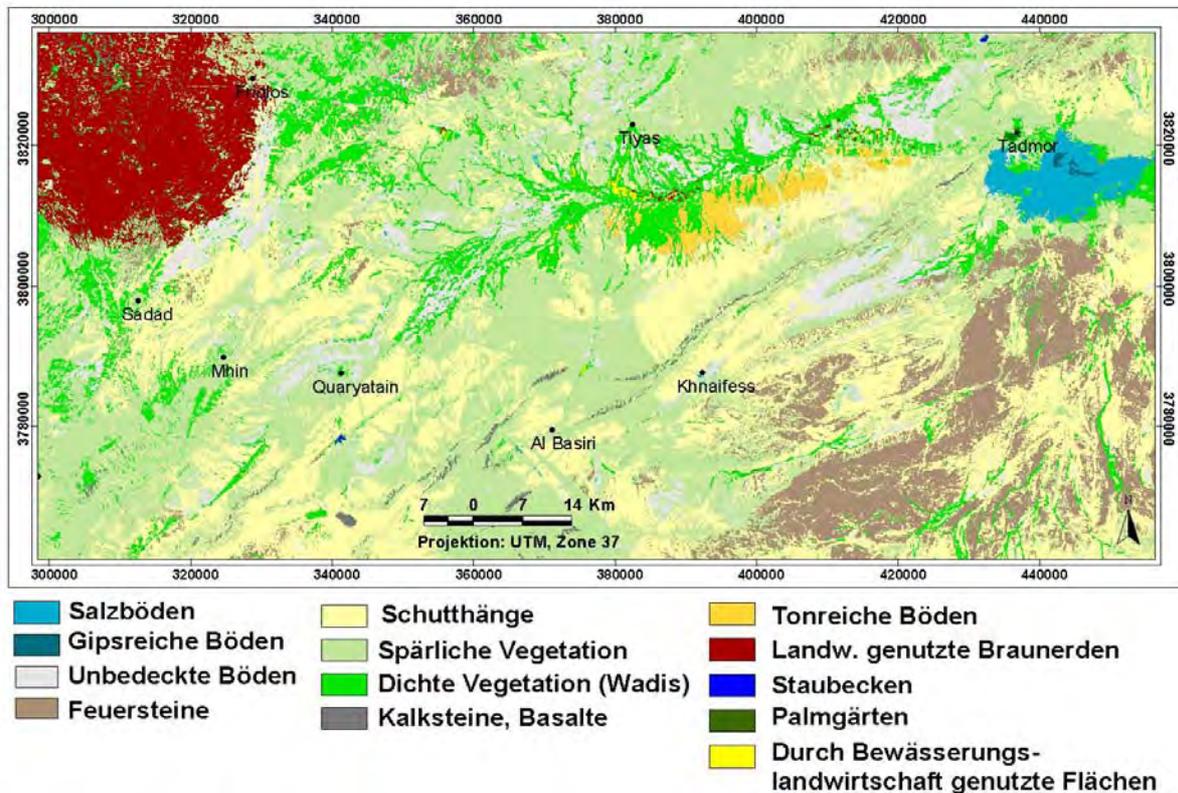


Abb. 3: Klassen der Landnutzung bzw. Oberflächenbedeckung im Untersuchungsgebiet

Die Klassifizierung wurde mithilfe von ERDASImagine, Version 8.2.8 (ERDAS, 1994) durchgeführt. Die Genauigkeit der Klassifikation lag bei 97 %. Schwierigkeiten bei der Klassifizierung traten hinsichtlich der Unterscheidung der Häuser oder Straßen von der Umgebung, da diese meist durch Bodenpartikel der umgebenden oft stark degradierten Böden bedeckt sind. Auch ließ sich oft die spärliche Steppenvegetation mit verstreut gelegenen Büschen nicht immer als Vegetation klassifizieren. Um eine solche Vegetationsbedeckung genau vom umgebenden Gelände abzugrenzen, müsste sie größer als 4 Pixel sein (PUECH, 2000), etwa 0.36 ha beim Landsat TM sensor, der eine Auflösung von 30 m hat.

Die Klassifizierungsergebnisse dienen zur Charakterisierung der Faktoren der Vegetationsbedeckung oder Steinigkeit der Böden, die verwendet wurden innerhalb der Indexmethode zur Bestimmung des Abflusspotentials. Das Abflusspotential ist das wichtigste Kriterium in der Entscheidungsmatrix zur Eignung der Flächen für Microcatchment-Anlagen (Tab.1). Andere Entscheidungskriterien umfassen die Nachbarschaft zu militärischen oder industriellen Anlagen oder die Nähe zu Straßen, da der erhöhte Abfluss von asphaltierten Straßen bei Microcatchment-Anlagen ebenfalls genutzt werden kann. Bestimmt wurde die Lage der Flächen durch Erstellung von Pufferzonen mit der entsprechenden Distanz zu den Objekten. Hangneigung und Nähe zu Straßen sind nach dem Abflusspotential die zweit und drittwichtigsten Kriterien bei der Wahl der geeigneten Flächen. Ob die Fläche nahe von Sied-

lungen liegen, wurde als weniger wichtig betrachtet, da hier die Anlagen zur Verbesserung des Futterangebots von Weidetieren betrachtet wird, die im Besitz von herumziehenden Beduinen sind.

Tab. 1: Entscheidungsmatrix zur Auswahl von geeigneten Flächen für Microcatchment-Anlagen

	A	B	C	D	E	F	Eigen- vector	Relative Gewichtung der Bedeutung
Nähe zu Siedlungen [A]	1	3	5	1/5	1/7	1/5	0.36	0.13
Nähe zu militär. und industriell.	1/3	1	3	1/5	1/5	1/5	0.38	0.14
Anlagen und Ödland [B]								
Geländeeinheit [C]	1/5	1/3	1	1/3	1/5	1/7	0.39	0.15
Nähe zu Strassen [D]	5	5	3	1	1/3	1/5	0.58	0.21
Hangneigung [E]	7	5	5	3	1	1/3	1.00	0.37
Abflusspotential [F]	5	5	7	5	3	1	1.72	0.63

4 Ergebnisse und Ausblick

Ergebnisse der Arbeit sind Karten potentieller Gebiete für Microcatchmentanlagen (Abb. 4) und dienen den zuständigen Behörden als Planungsgrundlage. Vor einer Dimensionierung von Anlagen muss das jeweilige Gelände noch genauer untersucht bezüglich des Abflusskoeffizienten, der sich über Niederschlag-Abfluss-Messungen, teils auch durch künstliche Berechnung ermitteln läßt.

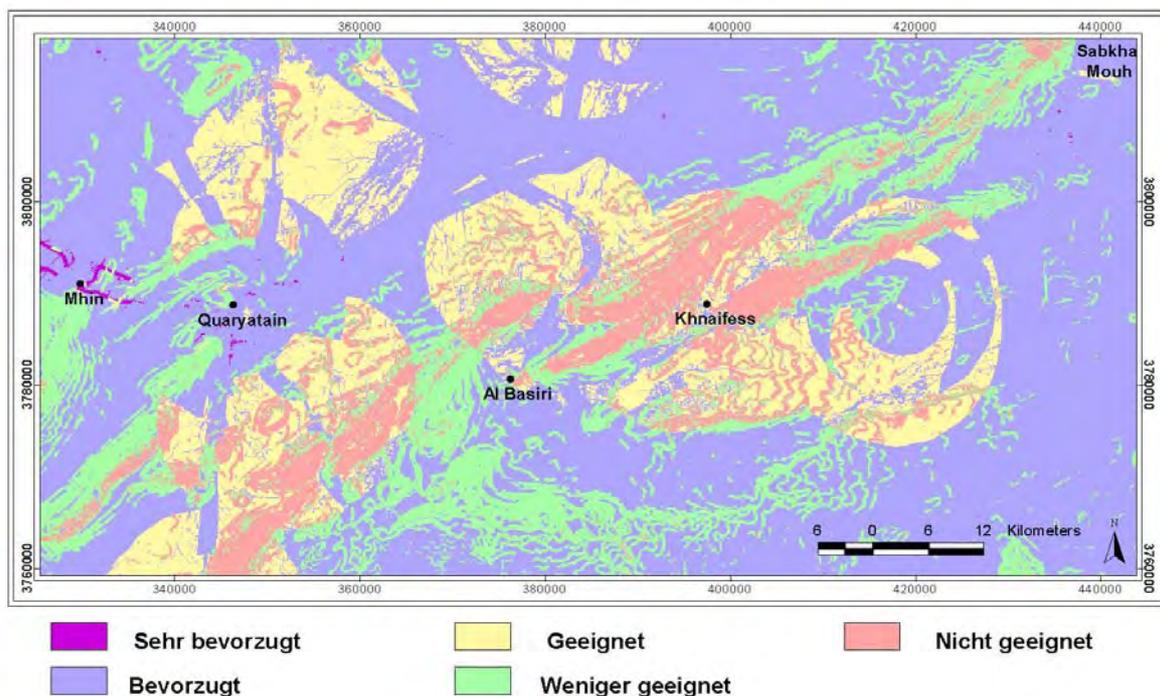


Abb.4: Potentielle Gebiete für Microcatchment-Anlagen

Die Informationen aus der Auswertung von Satellitenbildern kombiniert mit Datengrundlagen wie Geländemodell oder Bodenanalysedaten über ein Geoinformationssystem können somit gerade in schlecht erschlossenen und unzugänglichen Gegenden eine schnelle und umfassende Beurteilung liefern. Hochauflösende Sensoren wie z.B. IKONOS können heutzutage noch genauere Daten bezüglich der Vegetationsbedeckung in den semi-ariden Gebieten liefern.

Danksagung

Die Arbeit entstand im Rahmen eines vom Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit geförderten Projektes zwischen der Universität Karlsruhe und ICARDA (International Center for Agricultural Research in the Dry Areas). Für wesentliche Beiträge und Unterstützung dieser Arbeit, danke ich insbesondere Prof. Dr. sc. agr. DIETER PRINZ (Institut für Wasserbau und Kulturtechnik, TH Karlsruhe) und Prof Dr.-Ing. HANS-PETER BÄHR (Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TH Karlsruhe), ferner Dr. THEIB OWEIS (ICARDA, NRMP).

Literatur

- BÄHR, H.-P. (1999): GIS Introduction. Main concepts. - In: BÄHR, H.-P. & VÖGTLE, T. (eds), GIS for Environmental Monitoring, E.Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Nägele u. Obermiller, Stuttgart, Germany, p. 1-9
- CHAVEZ, P. S., 1988: An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. - Remote sensing of the Environment, **24**: 450-479
- ERDAS, 1994: ERDAS Imagine version 8.2.8. - ERDAS incorporation, Atlanta, Georgia, USA.
- ESRI, 1995: Arc View GIS Version 3.2. - ESRI, Redlands, California, USA
- ESRI, 1998: ArcInfo Version 7.2.1. - ESRI, Redlands, California, USA
- METEOROLOGISCHES DEPARTMENT, S.A.R., 1996. Data on rainfall and temperature of different stations in the *Bahdia* area.- Damascus, Syria
- OBERLE; A., 2004: GIS-Based Identification of Suitable Areas for Various Kinds of Water harvesting in Syria. – Doktorarbeit, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Universität Karlsruhe (TH).
- PRINZ, D., 1996. Water Harvesting, History, Techniques and Trends. Z. f. Bewässerungswirtschaft, **31**,1: 64-105.
- PUECH, C., BECHLER, N., MIETTON, M., 2000: Apport de la télédétection à l'étude des plaques de sol nus en zone soudanienne (Burkina Faso). - International. Journal of . Remote Sensing, **21** (1): 121-135
- SAATLY T. L. , 1980: The Analytic Hierarchy Process.- McGraw Hill, New York, USA
- SCHOWENGERDT, R.A., 1997: Models and methods for image processing. - 2nd.edition, Academic Press, San Diego, USA

Fernerkundung auf Schutz- und Förderflächen – Landnutzung von ausgewählten Moorschutzgebieten in Nordbayern

RAINER FUß¹, MARTIN BUCERIUS²

Das Landesamt für Umweltschutz ist als Brücke zwischen Theorie und Praxis bestrebt, die Leistungen moderner hochauflösender Fernerkundungssensoren unter Zugrundelegung der ökologischen Fachanforderungen auf Schutz- und Förderflächen zu erproben. Dabei wurde 2002 die satellitengestützte Erfassung der Landnutzung in 5 Moornaturschutzgebieten in Nordbayern untersucht. Darüber hinaus wurde eine Aufwandsabschätzung zur Übertragung der Methode auf ganz Bayern erarbeitet.

1 Einführung und rechtlicher Rahmen

Das Landesamt für Umweltschutz (LfU) hat als Behörde im Geschäftsbereich des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU) nach § 1 Ziff. 1 u. 2 der Verordnung über das LfU vom 15.12.1971, zuletzt geändert am 1.5.1994 „die Ermittlung von Grundlagen auf dem Gebiet des Umweltschutzes (§ 3)“ und „die Behandlung von Grundsatzfragen ... (§ 4)“ vorzunehmen.

Dabei sind nach § 2 Ziff. 4 „die Behandlung von Fachfragen auf den Gebieten des Naturschutzes, des Landschaftsschutzes, der Landschaftspflege ...“, durchzuführen und nach § 3 Ziff. 5 „die Erfassung und Beurteilung der geschützten und schützenswerten Landesteile“ sicherzustellen. Schließlich umfasst die a.a.O. in § 4 geregelte Behandlung von Grundsatzfragen dort in Ziff. 1 auch „die Untersuchung und Entwicklung von Systemen zur Kontrolle der Umweltbelastungen“.

2 Projektentwicklung und Ergebnisse

2.1 Aufgabenstellung

Ziel des vorliegenden Auftrags war es, die künftige Bearbeitung sämtlicher Naturschutzgebiete in Bayern im Bereich der fernerkundlichen Nutzungsermittlung vorzubereiten. Dabei sollte am Beispiel weniger, moorkundlich bedeutsamer Schutzgebiete (5 Gebiete) eine auf die übrigen Schutzgebiete in Bayern grundsätzlich übertragbare Vorgehensweise erprobt und entwickelt werden, die in den kommenden Jahren möglichst kosten- und zeitsparend die Ermittlung der aktuellen Landnutzungen in sämtlichen Schutzgebieten erlaubt.

Hierbei stand die zuverlässige Erfassung weniger, fachlich bedeutsamer Nutzungstypen im Mittelpunkt, sodass auch eine langfristige Aktualisierung dieser Nutzungsverhältnisse ratio-

¹ Dipl.-Ing. Rainer Fuß, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Abt. 5 Naturschutz und Landschaftspflege, Bürgermeister-Ulrich-Str. 160, 86179 Augsburg, Tel. 0821/9071-5099, e-mail: rainer.fuss@lfu.bayern.de

² Dr.-Ing. Martin Bucerius, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Abt. 5 Naturschutz und Landschaftspflege, Bürgermeister-Ulrich-Str. 160, 86179 Augsburg, Tel. 0821/9071-5081, e-mail: martin.bucerius@lfu.bayern.de

nell möglich wird. Damit sollte der Grundstein für ein bayernweites Landnutzungsmonitoring für die Schutzgebiete gelegt werden.

2.2 Bearbeitungsmethodik

Gebietsauswahl:

Für die vorliegende Bildanalyse wurden die folgenden 5 für Nordbayern typischen Moornaturschutzgebiete in Ostbayern ausgewählt.

- 400.002 Häuseloh
- 300.053 Moorgebiet bei Bärnau
- 400.003 Naturwaldreservat Fichtelseemoor
- 400.027 Hahnenfilz bei Mehlmeisel
- 400.070 Moor bei Krötenseewald

Datenauswahl und Geokorrektur:

Für die betroffenen Gebiete wurden unentgeltlich geeignete und technisch einwandfreie Satellitenbilder ausgewählt und beschafft, die Darstellungen bis etwa zum Maßstab 1:50.000 zulassen. Die aktuellen Daten stammen vom Landsat-ETM-Sensor vom 14. August 2000, die älteren Daten vom Landsat TM-Sensor vom 7. Juli 1989.

Beide Sensoren bieten 6 Farbkanäle im optischen und im infraroten Farbspektrum, dazu kommt ein Kanal im thermalen Bereich. Der Landsat-ETM-Sensor bietet zusätzlich einen panchromatischen Kanal mit 15 Meter Pixelauflösung. Der panchromatische Kanal wurde von HUGIN genutzt, um die Geometrie der Analyseergebnisse zu verbessern.

Die Daten wurden von HUGIN nach dem Gauss-Krüger-Koordinatensystem, Zone 4 (Westeuropa), Bessel-Ellipsoid entzerrt. Sie lassen sich damit deckungsgleich über die üblichen topographischen Karten legen. Die fünf Schutzgebiete konnten jeweils aus einem Satellitenbild geschnitten werden, so dass eine Kombination unterschiedlicher Satelliten-Szenen unterbleiben konnte. Die Präzision der Geokorrektur entspricht in flachen oder leicht gewellten Gebieten der Dimension der größten im Bild erkennbaren Objekte, in diesem Fall Objekte von ca. 30 Metern Durchmesser.

Nach der Geokorrektur wurden die vom LfU zur Verfügung gestellten, digitalen Schutzgebietsgrenzen in die Bilddaten integriert. Die Übereinstimmung an kritischen Übergängen (z.B. Straße neben Schutzgebietsgrenze) erforderte keine weiteren Korrekturen.

Der aktuelle und der „historische“ Datensatz wurden getrennt ausgewertet und im Anschluss an die Klassifikation der Landnutzungen verglichen. Die Vorgehensweise wird als „Entwicklungsanalyse“ (Change Detection) bezeichnet. Sie wurde verwendet, um in den Schutzgebieten Veränderungen in einem 10-Jahres-Zeitraum zu ermitteln.

Hinweis: Dem gegenüber wird die Analyse von Veränderungen im Lauf einer Vegetationsperiode häufig als „multitemporal“ bezeichnet. Hierfür werden Bilder verglichen, die mit wenigen Monaten Abstand gewonnen wurden. Multitemporale Analysen werden vor allem bei der Beobachtung landwirtschaftlicher Nutzflächen verwendet.

Bildanalyse und Klassifikation:

Für die Klassifikation sichtbarer Landnutzungen in Bayerischen Naturschutzgebieten hat sich HUGIN nach reiflicher Abwägung für eine Methode nach dem neuesten Stand der Technik entschieden. Mit der objektorientierte Bildanalyse isoliert man im ersten Schritt zusammenhängende Objekte im Bild und klassifiziert diese Objekte anschließend anhand ihrer Eigenschaften. Dabei lassen sich neben der Farbe (Spektralsignaturen), Form und Größe, Nachbarschaften und innere Strukturen der Objekte verwenden, um zu einer präzisen und reproduzierbaren Klassifikation zu gelangen.

Hinweis: Die verwendete Methode bietet besondere Vorteile in urbanen Räumen und bei hoch aufgelösten Bilddaten. Sie ist aber auch in der Lage, aus heterogenen Bildteilen sinnvolle Bildobjekte zu generieren. Heterogene Bildteile sind typisch für naturnahe Landschaftselemente. Für Ergebnisse in GIS-kompatibler, vektorieller Form ist die objektorientierte Bildanalyse Voraussetzung.

Die Klassifikation selbst baut im Fall der Schutzgebiete im wesentlichen auf den bekannten Spektralsignaturen auf. Mit Ausnahme von Stillgewässern sind die größten natürlichen Objekte innerhalb der Schutzgebiete Bäume. Sie sind in den preisgünstigen Landsat-Daten als Einzelobjekte nicht erkennbar. Dementsprechend können Objektform und -größe nur marginal für die Klassifikation genutzt werden. Übergeordnete Objekte wie Waldinseln, Hecken oder Freiflächen erleichtern dagegen eine reproduzierbare Interpretation.

Die Ergebnisse einer objektorientierten Bildanalyse lassen sich mit geringem Aufwand manuell optimieren. Dabei wird die Zuordnung vollständiger Bildobjekte zu den Zielklassen durch Interpretation überprüft und im Bedarfsfall korrigiert. Die Objektgrenzen werden nicht verändert. Im Fall der fünf untersuchten Moorschutzgebiete war eine manuelle Optimierung nur beim Schutzgebiet bei Bärnau nötig, um den Einfluss der Wolkenschatten zu umgehen.

2.3 Ergebnisse des Projekts

Verifikation der Bildanalyse im Projektverlauf:

Die ersten Ergebnisse der Bildanalyse wurden zusammen mit Fachleuten des LfU an drei der fünf Moorschutzgebiete vor Ort überprüft. Die Begehung vor Ort und die Analyse der Satellitendaten ergaben übereinstimmend eine Tendenz zur Abnahme charakteristischer Moorflächen zugunsten der Waldflächen im Vergleich zu den etwas älteren Planungsunterlagen aus dem Archiv des LfU.

Diese Tendenz wird von der Auswertung der „historischen“ Satellitendaten von 1989 bestätigt. Die ausgewählten Moorschutzgebiete erscheinen dort als „Offenlandbiotop“ oder „lichte Laubwälder“, eingebettet in größere Nadelwaldgebiete. Die Schutzgebiete „Krötensee-wald“ und „Hahnenfilz“ erscheinen im aktuellen Satellitenbild dichter bewachsen als im „historischen“, die Schutzgebiete bei Bärnau und der „Häuseloh“ erscheinen jedoch unverändert. Im Schutzgebiet „Fichtelsee“ konnten durch Bildanalyse Windwurfflächen gefunden werden, die sich im Satellitenbild deutlich von moortypischem Offenland unterscheiden. Die Detektion einer Windwurffläche setzt allerdings voraus, dass die betreffende Fläche vorher mit Sicherheit ein Waldgebiet war.

Das Schutzgebiet „Hahnenfilz“ liefert ein gutes Beispiel für Nutzen und Grenzen der Bildanalyse. Im südwestlichen Teil des Hahnenfilzes befindet sich ein kleiner Tümpel, der mit einer Größe von ca. 25 x 50 Metern im Satellitenbild nur dann erkennbar ist, wenn man danach sucht. In der Klassifikation ist der Tümpel nicht erfasst. Andererseits unterscheidet sich die Braunseggen-Vegetation auch im Satellitenbild deutlich von landwirtschaftlich genutzten Grünflächen. Die Abnahme wertvoller Moorflächen zugunsten des Waldanteils in den letzten zehn Jahren ist somit auch in der Klassifikation erkennbar.

Rationell erfassbare Landnutzungen in Schutzgebieten:

Mit Daten des Landsat-TM Sensors und vergleichbaren Systemen (SPOT 5, IRS-Liss) lassen sich traditionell 10 bis 15 verschiedene Landnutzungen unterscheiden. Durch die lange Erfahrung mit den genannten Sensoren kann die Anzahl der unterscheidbaren Klassen als vorgegeben gelten. Die objektorientierte Bildanalyse führt Form, Größe und Kontext von Bildobjekten als zusätzliche Merkmale ein und erweitert so die rationell erfassbaren Landnutzungen. So kann z.B. ein Stadtpark von einer außerstädtischen Grünfläche unterschieden werden, Verkehrswege können von versiegelten Plätzen unterschieden werden usw.

Tab. 1: Rationell erfassbare Landnutzungen mit Landsat TM, SPOT, ISS etc.

Typ	Beschreibung
Natur	Natürliche oder naturnahe Landschaftsbestandteile
Nadelwald	Zusammenhängender Baumbestand mit vorwiegend Nadelgehölzen
Laubwald	Zusammenhängender Baumbestand mit vorwiegend Laubgehölzen
Mischwald	Zusammenhängender Baumbestand mit Nadel- und Laubgehölzen, mindestens 20% Laub- oder Nadelanteil (hier nicht relevant)
Lichtung	Offenlandfläche in waldreicher Umgebung
Gewässer	Fließ- und Stillgewässer
See	Offene Stillgewässer mit mindestens 50 Metern Breite
Fluss	Fließgewässer mit einer Breite über 25 Meter. Schmalere Fließgewässer sind oft durch ihre Uferbegleitvegetation charakterisiert.
Nutzfläche	Landwirtschaftliche Nutzfläche
Acker	Ackerfläche mit reifem Getreide
Boden	Ackerfläche ohne Frucht, frisch umgebrochene Fläche, offener Boden ohne nennenswerte Pflanzenbedeckung
Grünfläche	Ackerfläche mit grünen Pflanzen, Grünfütteranbau, Erwerbsgartenbau, kultivierte Flächen mit grünen Pflanzen und intensiver Stoffwechselaktivität
Offenland	Krautige oder einjährige Pflanzen, dazu Gebüsch mit einem Flächenanteil von höchstens 30%, keine erkennbare landwirtschaftliche Flächennutzung zum Aufnahmezeitpunkt.
Anthropogen	Siedlungen, Baustellen, Rohstoffgewinnung
Vorstadt	Aufgelockerte Bebauung mit hohem Grünanteil (hier zu „Siedlung“ zusammengefasst)
Stadt	Verdichtete Blockbebauung, Wohnen, Verwaltung und gewerbliche Bebauung (hier zu „Siedlung“ zusammengefasst). Dörfliche Bebauung ähnelt dem Typ „Stadt“
Industrie	Industrietypische großflächige Gebäude (hier zu „Siedlung“ zusammengefasst)
Baustelle	Offener Boden, Abgrabung oder Aufschüttung innerhalb der Siedlungsflächen, Neubauten (hier zu „Siedlung“ zusammengefasst)
Straßen	Breite Verkehrswege, Verkehrsweg-Baustellen (hier nicht vorhanden)
Abbau	Abbau- oder Aufschüttungsflächen, Deponien, Halden außerhalb der Siedlungsbereiche

Für die hier betrachteten fünf Moorschutzgebiete sind nur vier der oben beschriebenen Klassen relevant:

Laub- und Nadelwälder, Offenland und Gewässer. Siedlungen und landwirtschaftliche Nutzung sollten in Moorschutzgebieten nicht vorkommen und wurden in diesem Fall auch nicht beobachtet.

Für die folgenden Betrachtungen ist zu beachten, dass sich Moore mit optischen Sensoren von anderen, weitgehend naturbelassenen, offenen Grünflächen oder lichten Wäldern nicht grundsätzlich unterscheiden lassen. Typische Moorflächen lassen sich im Bild als Gebiete mit krautiger Vegetation, geringem oder fehlendem Baumbestand und vergleichsweise geringer Stoffwechselaktivität charakterisieren. Der Wassergehalt des Bodens kann mit optischen Daten nicht bestimmt werden, genauso wenig wie das Artenspektrum der krautigen Pflanzen. Zunehmende Gehölzdichte aufgrund von Entwässerungsmaßnahmen ist dagegen gut erkennbar, was im Fall der Moorschutzgebiete indirekte Aussagen zum Schutzzweck ermöglicht.

Erfassungsergebnisse zum Schutzgebiet 400.002 Häuselloh

Im Satellitenbild erscheint die Schutzgebietsfläche bewaldet, mit einem lichterem, laubwaldähnlichen Teil in der westlichen Hälfte des Schutzgebiets. Die lichterem Bereiche des Schutzgebiets erscheinen in ihrer Ausdehnung zwischen 1989 und 2000 unverändert.

In der Klassifikation erscheinen die lichterem Waldteile im westlichen Schutzgebietsbereich teilweise als „Laubwald“, teilweise als „Lichtung“. Die übrigen Flächen sind als „Nadelwald“ klassifiziert. Die Klassifikation des Bildes von 1989 zeigt qualitativ das gleiche Ergebnis, die fehlende Information aus dem panchromatischen Kanal mit 15 Meter großen Pixeln führt hier zu einem deutlich größeren Bild.

Eine manuelle Optimierung hätte ergeben, dass in beiden Fällen dem Nadelwaldbereich im Osten des Gebiets ein lichterem westlicher Teil gegenübersteht, der eher einem „Laubwald“ als einem „Offenland“ ähnlich ist.

Die Begehung ergab typische Moorflächen im westlichen Bereich des Schutzgebiets, gleichzeitig aber Anzeichen wiederholter Schübe von Bewaldung und anschließendem Absterben des jungen Baumbestandes. Derzeit kommt wieder Jungwuchs auf. Vermutlich sind wechselnde Wasserstände die Ursache für den aktuellen Zustand. In den Archivdaten von 1991 sind die lichten Bereiche als Kiefern-Birken-Mischwald kartiert, teilweise mit Vernässungen, der östliche Bereich des Schutzgebiets als geschlossene Waldfläche. Offene Flächen mit Heidecharakter erschienen bei der Begehung ausgedehnter als in der Kartierung.

Bei der Ortsbegehung wurden Inkonsistenzen der Schutzgebietsgrenzen zwischen Kartierung und digitalen Grenzen festgestellt. Nach Einschätzung vor Ort wurde die digitale Grenze als zutreffend bewertet und für diese Arbeit verwendet.

Erfassungsergebnisse zum Schutzgebiet 300.053 Moorgebiet bei Bärnau

Das aktuelle Satellitenbild ist im Bereich des Schutzgebiets stark von Wolken beeinflusst, die Zuverlässigkeit der Klassifikation ist deshalb stark eingeschränkt. Die Qualität des „historischen“ Satellitenbildes ist dagegen einwandfrei.

Das Satellitenbild zeigt im westlichen Teil des Schutzgebiets Nadelwaldflächen mit ausgedehnten lichten Bereichen im zentralen Teil des Schutzgebiets. Außerhalb des Wolkenschattens erscheint der lichte Bereich des Schutzgebiets zwischen 1989 und 2000 unverändert. Das westliche Drittel des Schutzgebiets erscheint landwirtschaftlich genutzt, insbesondere eine exakt rechteckige, frisch grüne Fläche am Rand des zusammenhängenden Waldgebiets.

In der Klassifikation des aktuellen Bildes ist der westliche Bereich des Schutzgebiets als „Nadelwald“ klassifiziert, die Freiflächen als „Lichtung“. Die vermutlich landwirtschaftlich genutzten Flächen im östlichen Drittel des Schutzgebiets zeigen die Klasse „Grünfläche“ und „Offenland“. Die Klassifikation des Bildes von 1989 lässt keine deutlichen Veränderungen erkennen. Eine manuelle Nachbearbeitung hätte unter Berücksichtigung der ungünstigen Datenlage keine zusätzlichen Aspekte ergeben.

Im Schutzgebiet bei Bärnau fand keine Begehung statt.

Erfassungsergebnisse zum Schutzgebiet 400.003 Naturwaldreservat Fichtelseemoor

Im Satellitenbild wird das Schutzgebiet von Nadelwald dominiert, nördlich des Fichtelsees und am Ostende des Schutzgebiets sind offene Flächen erkennbar. Das aktuelle Satellitenbild zeigt nordwestlich des Fichtelsees und am äußersten Ostende des Schutzgebiets ungewöhnliche Bereiche, die bei der Begehung als Windwurfflächen identifiziert wurden. Darüber hinaus sind im Satellitenbild bis auf die Ufer des Fichtelsees, der nicht mehr zur Schutzgebietsfläche gehört, keine wesentlichen Veränderungen zwischen der aktuellen und der historischen Situation erkennbar.

Die Klassifikation entspricht diesem Befund, wobei Windwurfflächen nur klassifizierbar sind, wenn größere Flächen betroffen werden. Eine manuelle Optimierung hätte ergeben, dass aus dem Satellitenbild keine wesentlichen Veränderungen des Schutzgebiets ableitbar sind und die Wald-Offenland-Verteilung den Archivdaten des LfU entspricht. Spirken sind im Satellitenbild nicht von anderen Nadelhölzern zu unterscheiden.

Bei der Begehung konnten typische Moorflächen nur noch am nordwestlichen Ufer des Fichtelsees gefunden werden. Die Flächen erwiesen sich als vergleichsweise trocken (problemlos begehbar). In den offenen Bereichen in größerer Entfernung zum Fichtensee ist der Moorcharakter stark zurückgedrängt. Die Beobachtungen bei der Begehung decken sich im wesentlichen mit den Archivdaten vom November 1992.

Erfassungsergebnisse zum Schutzgebiet 400.027 Hahnenfilz bei Mehlmeisel

Das Satellitenbild zeigt bewaldete Flächen im Nordteil des Schutzgebiets, die im Südteil in offene Flächen übergehen. Der Waldanteil ist im aktuellen Satellitenbild weiter nach Süden ausgedehnt als im Bild von 1989, die offene Fläche entsprechend kleiner.

In der Klassifikation der aktuellen Bilder ist die nördliche Hälfte des Gebiets als „Laubwald“ klassifiziert, die südliche als „Lichtung“. In den Bilddaten von 1989 wird die gesamte Schutzgebietsfläche der Klasse „Lichtung“ zugeordnet. Eine manuelle Optimierung hätte die Flächenunterschiede zwischen „Lichtung“ und „Laubwald“ im „historischen“ und im aktuellen Bild etwas nivelliert, die Tendenz der fortschreitenden Bewaldung aber bestätigt.

Die Ortsbegehung ergab deutliche Anzeichen von zunehmendem Wassermangel und damit verbundenem Aufwuchs von Kiefern im (noch) offenen südlichen Bereich des Schutzgebiets. Dazu kamen deutliche Spuren von Entwässerungsmaßnahmen. Die in den Archivdaten von 1990 als „Braunseggensumpf“ kartierten Bereiche tendierten zum Heidecharakter. Die Archivdaten entsprachen den Bilddaten von 1989 mit noch deutlich größeren, offenen Moorflächen im südlichen Bereich des Schutzgebiets. Die kartierten Pflanzengesellschaften schienen im wesentlichen noch erhalten zu sein.

Erfassungsergebnisse zum Schutzgebiet 400.070 Moor bei Krötenseewald

Das Satellitenbild zeigt eine bewaldete Fläche mit einem lichterem Bereich im Zentrum des Schutzgebiets, der einem Laubwald ähnlicher ist als einer offenen Fläche. In der Aufnahme aus dem Jahr 2000 erscheinen die lichten Bereiche dichter bewachsen als 1989, bedecken aber dieselbe Fläche.

In der Klassifikation ist der zentrale Bereich des Schutzgebiets als „Laubwald“ eingeordnet, der Randbereich als „Nadelwald“. Das Ergebnis von 1989 ist qualitativ identisch. Die ehemalige Grenze zwischen BRD und DDR durchzieht das Bild als deutliche Linie.

Eine manuelle Nachbearbeitung hätte ergeben, dass die Ausdehnung der lichten Bereiche 1989 und 2000 keine deutlichen Unterschiede aufweist, die lichte Fläche 1989 aber insgesamt heller, d.h. weniger dicht bestanden erscheint. Geringfügige Flächenunterschiede bei der Klasse „Laubwald“ würden voraussichtlich als bedeutungslos bewertet. Hinweise auf offene Flächen finden sich im Satellitenbild nicht.

Im Schutzgebiet „Krötenseewald“ fand keine Begehung statt.

3 Hinweise zur Zeit- und Aufwandsschätzung für die Erhebungen

Die in diesem Auftrag verwendete Technik zur Analyse von Satellitenbildern könnte mit geringem Aufwand auf große Flächen und beliebige Schutzgebietstypen, z.B. FFH-Gebiete übertragen werden.

Im vorliegenden Auftrag wurden Schutzgebiete und ihre Umgebung bewusst mit einem einheitlichen, auf die ganze Landesfläche anwendbaren Algorithmus nach sichtbaren Landnutzungen klassifiziert. Die Bildanalyse beruht auf den sehr preisgünstigen Daten des Landsat 7 Sensors. Spezielle „Schutzgebietsklassen“ wurden nicht gebildet. Für die Bildanalyse kam die Technik der objektorientierten Analyse zum Einsatz. Diese standardisierte Vorgehensweise erlaubt sinnvolle Aussagen über die Schutzgebiete, stellt aber nur die unterste fachliche Stufe der möglichen Analyse von Satellitenbildern dar.

In Anbetracht der relativ geringen Fläche und überschaubaren Anzahl der Schutzgebiete würde es sich empfehlen, die Klassifikation der Schutzgebietsflächen im Regelfall durch eine manuelle Nachbearbeitung zu optimieren, um auch grundsätzlich erkennbare, aber nicht durch automatische Klassifikation erfassbare Eigenschaften der Gebiete zu erfassen.

Panchromatische Luftbilder der Landesvermessung, Pflegepläne oder Ergebnisse der Zustandserfassung können zusammen mit den Klassifikationsergebnissen für eine gezielte Interpretation der Bilddaten verwendet werden. Die zusätzliche Information hilft kleine Strukturen im Bild zu erkennen (z.B. kleine Gewässer) und Entwicklungen im Gebiet nachzuvollziehen (z.B. Windwurfflächen). Insgesamt können so mehr Bildelemente erfasst und gegebenenfalls gemeinsam mit örtlichen Fachleuten auf ihre Bedeutung geprüft werden.

Darüber hinaus können Satellitenbilder, Luftbilder und weitere Dokumente zu einem Schutzgebiets-GIS kombiniert werden. Aus den Satellitenbildern und den Ergebnissen der Flächenanalyse kann eine übersichtliche Bildkarte erstellt werden, aus der vertiefende Information wie digitalisierte Luftbilder, Geländeaufnahmen, Photos und weitere Daten durch einfaches Anklicken aufgerufen werden können. Das GIS kann so gestaltet werden, dass Dokumente jeder Art – bis hin zum Faksimile der Schutzgebietsverordnung – auch nachträglich integriert werden können.

In diesem Zusammenhang könnten auch ca. 700 panchromatische Ortholuftbilder im Maßstab 1:10.000 zu den Schutzgebieten sowie bei Bedarf weitere digitale Unterlagen genutzt werden.

Die Ergebnisse würden dann als attributierte GIS-Fachschichten (Vektorlayer) geliefert. Für die Bearbeitung der bayerischen Schutzgebiete entstünden somit keine gesonderten Datenkosten. Die benötigten Satellitenbilder würden vielmehr von HUGIN beschafft und im Besitz der HUGIN GmbH verbleiben. Wird neben der Klassifikation der sichtbaren Landnutzungen eine weitergehende Bearbeitung der Satellitenbilder benötigt, würden zusätzliche Kosten anfallen. Für die Übergabe der Originaldaten würden darüber hinaus Lizenzgebühren fällig.

Die Entwicklung von Satellitensensoren ist nicht abgeschlossen. Der Landsat-Sensor wird bei gleich günstigem Preisgefüge und bei gleich bleibender spektraler Auflösung mit höherer räumlicher Auflösung nach wie vor gebaut. Der Prototyp ALI gibt bereits einen Eindruck. Erheblich aufgewertet wird auch das SPOT-System, das preislich eher im Bereich der Landsat-Sensoren angesiedelt ist, von seiner optischen Leistung aber eher mit hochauflösenden Systemen wie IKONOS oder QuickBird verglichen werden muss. Mit entsprechend höherem Aufwand bei der Datenanalyse lassen sich dann natürlich wesentlich detailliertere Informationen ableiten.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Kosten für Satellitenbilder und ihre Analyse betragen nur einen Bruchteil der Kosten für Beschaffung und Bearbeitung von Luftbildern oder für vegetationskundliche Analysen vor Ort. Andererseits liefern Satellitenbilder auch nur eine geringere Informationsdichte.

Daten aus dem Archiv des LfU wie Zustandserfassung oder Pflegepläne zeigen die Schutzgebiete im Maßstab 1:2.500. Die hier verwendeten Satellitenbilder entsprechen dagegen einem Maßstab von ca. 1:50.000. Die Analyse von Satellitenbildern erhebt daher keinen Anspruch, Vegetationskartierungen oder vergleichbare Arbeiten zu ersetzen. Durch die Analyse von Satellitenbildern lassen sich vielmehr Veränderungen erkennen, die eine weitere fachliche Bearbeitung vor Ort nahe legen. Im Umkehrschluss kann eine vorausgehende Satellitenbildanalyse die vergleichsweise aufwendigen Arbeiten vor Ort fachlich begründen, weil sie gezielt auf Flächen mit erhöhtem Informationsbedarf konzentriert werden können.

Die Analyse von Satellitenbildern kann die Entwicklung von Schutzgebieten großflächig und hochaktuell dokumentieren und diese Entwicklung auf einer ersten Stufe fachlich bewerten. Als Ergänzung der vegetationskundlichen Arbeit vor Ort kann die Analyse von Satellitendaten die notwendigerweise punktuelle Arbeiten vor Ort zu einem vollständigen Bild des aktuellen Zustands der Schutzgebiete verknüpfen. Für eine landesweite Bilanz ist Fernerkundung mit Satellitenbildern bei weitem die wirtschaftlichste Methode.

Satellitenbilder lassen sich aus Archiven beschaffen. Die historische Entwicklung eines Gebiets kann auch im Nachhinein, also ohne vorausschauende Planung, dokumentiert und analysiert werden. Historische Satellitendaten sind ab Mitte der 60-er Jahre aus Archiven verfügbar, multispektrale Daten ab Beginn der 80-er Jahre. Für diesen Auftrag wurden Daten des zivilen US-amerikanischen Landsat-Sensors verwendet. Sie sind derzeit die wirtschaftlichste Datenquelle für Satellitenbilder. Der Sensor wird laufend weiterentwickelt, behält dabei aber seine grundlegenden Charakteristika, so dass die Daten vergleichbar bleiben. Es gibt im übrigen keine Hinweise, dass die Serie der Landsat-Sensoren eingestellt werden soll.

5 Literatur

- ALBERTZ, J. 2001: Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. 2. Aufl. 249 S. Wiss. Buchgemeinschaft, Darmstadt
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ 2001: Unterstützung der Naturschutzarbeit in Bayern durch die Fernerkundung – LfU-Dokumentationsheft zur Fernerkundung 1995 – 2000 147 S. Augsburg 2001
- BUCERIUS, M.; FUSS, R.: Fernerkundung auf Schutz- und Förderflächen – Zwei Projekte des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz In: Bd. 12 der DGPF-Publikationen Vorträge zur 23. Jahrestagung in Bochum; 464 S. S. 229 - 237 Münster 2003
- BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (Hrsg), GLÄSSER, C. (Bearb.), 2001: Naturschutz und Fernerkundung – Referate der gleichnamigen Tagung der DGPF und des BfN 11.-12. Mai 2000, INA, Insel Vilm, BfN-Skripten 42 119 S., Bonn

Detektion von Schlaggrenzen und der Bodenbearbeitungsrichtung ackerbaulich genutzter Flächen aus höchstauflösenden Fernerkundungsdaten (Quickbird)

HEIKE GERIGHAUSEN , MARKUS MÖLLER

Zusammenfassung: Die landwirtschaftliche Nutzfläche ist in Ackerschläge gegliedert, die das Prozessgeschehen lateraler Stoffflüsse durch die schlagsspezifische und aktuelle Bodenbewirtschaftung maßgeblich beeinflussen. Auf Ackerschläge zielen sowohl Maßnahmen hinsichtlich der EU-Wasserrahmenrichtlinie als auch der im § 17 Bundesbodenschutzgesetz formulierten „Guten fachlichen Praxis“ zur nachhaltigen Sicherung und Erhaltung der Ertragsfähigkeit der Ackerflächen ab. Insbesondere die Bearbeitungsrichtung stellt dabei einen Faktor dar, der bisher aufgrund mangelnder flächendeckender Verfügbarkeit in Modellierungen mittel- bis kleinmaßstäbiger Untersuchungsgebiete kaum einbezogen werden konnte.

Die operationelle Detektion von Ackerschlägen und der Bearbeitungsrichtung auf der Grundlage von satellitengestützten Sensoren scheiterte in der Vergangenheit an der zu geringen geometrischen Auflösung der Satellitenbilddaten. Mit dem Aufkommen neuer höchstauflösender Satellitensysteme (z.B. Quickbird, Ikonos) können diese Limitierungen überwunden werden.

In der vorliegenden Arbeit wird daher ein Verfahren zur automatisierten Detektion von Schlaggrenzen sowie zur Ableitung der Bodenbearbeitungsrichtung aus höchstauflösenden Satellitenbilddaten vorgestellt. Die Untersuchungen basieren auf einer Aufnahme des Quickbird-Satelliten eines stark ländlich geprägten Raumes nordöstlich der Stadt Leipzig. Mithilfe eines Region Growing-Verfahrens werden die Bilddaten segmentiert. Ein wissensbasiertes, hierarchisches Regelwerk gestattet sodann die Klassifikation der gebildeten Objekte und somit die Identifikation der einzelnen Ackerschläge. Die schlagbezogene Auswertung von Texturparametern, die durch grey-level co-occurrence-Matrizen aus den panchromatischen Quickbird-Daten abgeleitet wurden, ermöglicht anschließend die Detektion der Bearbeitungsrichtung in vier möglichen Orientierungen. Die angewandte Methode liefert gute bis sehr gute Ergebnisse. Vor- und Nachteile sowie Einschränkungen des Verfahrens werden diskutiert.

1 Einleitung

Für die Modellierung des Wasser- und Stoffhaushaltes, insbesondere lateraler Stofftransportprozesse durch Bodenerosion, ist die räumliche Strukturierung der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Ackerschläge ebenso wie deren Oberflächenbeschaffenheit von entscheidender Bedeutung (LUDWIG et al., 1995). Nach dem Bundesbodenschutzgesetz (BBODSCHG, 1998) bzw. den „Handlungsempfehlungen zur guten fachlichen Praxis der landwirtschaftlichen Bodennutzung“ (GLP¹) setzt eine standortgerechte Bodenbewirtschaftung daher die Bereitstellung schlagbezogener Standortdaten voraus (SCHRÖDTER & STEININGER, 2000).

Für die Bewertung von Ackerflächen hinsichtlich ihrer potenziellen Erosionsgefährdung, wie sie in der GLP ausdrücklich gefordert wird, werden unter anderem Informationen zur Lage, Größe und Form der Ackerschläge benötigt. Aufgrund der hohen zeitlichen Veränderung können diese jedoch durch die Liegenschaftsämter weder flächendeckend noch aktuell bereit gestellt werden. Ebenso wenig liegen Informationen zur Bodenbearbeitungsrichtung vor, die

¹ Standpunktpapier zu §17 des BBodSchG (1998)

bereits in mittelmäßig bewegtem Gelände entscheidenden Einfluss auf den Bodenabtrag ausübt und als wirksame Erosionsschutzmaßnahme eingesetzt werden kann (SCHWERTMANN et al., 1987).

Daten und Methoden der Fernerkundung stellen eine umfassende Quelle wichtiger Standortinformationen dar. Bislang liegen jedoch nur wenige Arbeiten vor, die sich mit der automatisierten Detektion von Schlaggrenzen und der Beschreibung räumlicher Strukturen von Ackerflächen aus Satellitenbilddaten beschäftigen. So versuchen DONNER et al. (2002) anhand zweier Landsat-Satellitenbildszenen Schlagvektoren über eine multitemporale Klassifikation der Feldfrüchte abzuleiten. Neben Schwierigkeiten bei der Trennung spektral sehr ähnlicher Anbaukulturen sind der Qualität des Ergebnisses insbesondere durch die räumliche Auflösung der Daten Grenzen gesetzt. Deutlich erfolgsversprechender scheint dagegen eine Studie von FOCKELMANN (2001), in der mithilfe eines objektbasierten Ansatzes hochauflösende CIR-Luftbilddaten zunächst segmentiert und dann klassifiziert werden. Die Kennzeichnung der Bearbeitungsrichtung ackerbaulich genutzter Flächen scheint dagegen bisher kaum Beachtung in der Satellitenbilddatenauswertung gefunden zu haben. Zu einer ähnlichen Feststellung kommen auch WASSENAAR et al. (2002), die sich mit der Detektion von Weinbauflächen, deren Pflanzmuster, -abständen und -orientierung auseinandersetzen. Weitere Arbeiten beschäftigen sich mit der Identifikation von Bearbeitungspraktiken (VINA et al., 2003; SOUTH et al., 2004). Die Betrachtung räumlicher Strukturen findet darin allerdings keine Beachtung.

Im folgenden wird daher mithilfe eines objektbasierten Ansatzes eine Methode vorgestellt, die die automatisierte Ableitung von Ackerschlägen bzw. deren Grenzen aus höchstauflösenden Satellitenbilddaten (Quickbird) gestattet. Bezogen auf den einzelnen Ackerschlag wird im Anschluss ein Verfahren dargelegt, dass die Einordnung der Bodenbearbeitungsrichtung bzw. der räumlichen Anordnung der Anbaukulturen in den vier Klassen Horizontal, Vertikal, Links- und Rechtsdiagonal erlaubt. Da bisher nur wenige Studien zur Arbeit mit Quickbird-Satellitendaten veröffentlicht wurden, wird zu Beginn des Beitrages ausführlicher auf die verwendeten Satellitenbilddaten und deren Aufbereitung eingegangen.

2 Daten und Datenvorverarbeitung

2.1 Quickbird-Satellitenbilddaten

Seit dem erfolgreichen Start der Mission im Oktober 2001 ist mit Quickbird 2 der Firma Digital Globe der zurzeit höchstauflösende, kommerziell verfügbare Fernerkundungssatellit in der Erdumlaufbahn. Quickbird erreicht in Abhängigkeit vom Sensorschwenkwinkel der Aufnahme (0 - 25°) im panchromatischen Kanal eine Auflösung von 0,61 - 0,72 m und im multispektralen Bereich eine Auflösung von 2,44 - 2,88 m. Damit tritt Quickbird in einen Maßstabsbereich vor, der bisher dem Luftbild vorbehalten war (TOUTIN & CHENG, 2002). Dagegen weisen sie im Vergleich zum Luftbild eine deutlich größere Flächendeckung, einen weitaus geringeren Vorprozessierungsaufwand, eine bessere spektrale Auflösung (vgl. Tab. 1) sowie einen geringeren Kostenaufwand auf.

Für die vorliegenden Untersuchungen stand eine ca. 11 x 11 km große Szene vom 24.09.2002 vom Produkttyp Standard Imagery zur Verfügung. Abgesehen von zwei kleineren Wolkenfeldern ist die Bildqualität der Daten als sehr gut einzuschätzen. Weitere atmosphärische Beeinflussungen liegen nicht vor. Allerdings wird die Aufnahme infolge des sehr hohen Sensorschwenkwinkels (24°) durch starke Schattenschläge beeinträchtigt, die

insbesondere die Erkennung städtischer Gebäudestrukturen erschwert. In der panchromatischen Aufnahme sind zudem einige Übersteuerungspunkte enthalten, die auf Sensorübersättigung zurückzuführen sind (vgl. MEINEL & REDER, 2001).

Tab. 1: Allgemeine technische Spezifikation von Quickbird 2
(www.eurimage.com/products/quickbird.html)

Sensor	Quickbird
Umlaufbahn/Inklination/ Umlaufzeit	450km/ 97,2°/ 1-3,5d
Bildtiefe	16 bit (65.536 GW)
Sensorschwenkwinkel	0-25°
Auflösung	0,61 – 0,72 m (Pan) 2,44 – 2,88 m (MS)
Panchromatisch	0,45 – 0,90 µm
Kanal 1 (VIS, b)	0,45 – 0,52 µm
Kanal 2 (VIS, g)	0,52 – 0,60 µm
Kanal 3 (VIS, r)	0,63 – 0,69 µm
Kanal 4 (NIR)	0,76 – 0,90 µm

2.2 Georeferenzierung der Quickbird-Szene

Der gelieferte Produkttyp (Standard Imagery) ist bereits auf ein vorwählbares Ellipsoid (WGS84) und eine Kartenprojektion (Geographic Lat/Long) radiometrisch kalibriert und hinsichtlich sensor- und plattformbedingter Verzerrungen geometrisch korrigiert. Ohne Berücksichtigung reliefbedingter Verzerrungen wird seitens „Digital Globe“ eine absolute Lagegenauigkeit von bis zu 14 m (RMSE) angegeben. Um jedoch die geometrische Auflösung der Bilddaten auszuschöpfen und eine Übereinstimmung mit allen anderen räumlichen Datensätzen zu gewährleisten, ist eine Entzerrung der Szenen erforderlich. In beiden Fällen wurde eine „Bild-zu-Bild“-Entzerrung anhand 38 bzw. 40 gesetzter Passpunkte mithilfe des „Quickbird-RPC-Modells“ in Erdas Imagine 8.5 durchgeführt. Als Referenzgrundlage diente ein Ortholuftbildmosaik. Das Modell ermöglicht die Einbeziehung aufnahmespezifischer Sensordaten, die in Form eines sogenannten RPC-Files von „Digital Globe“ mit den Bilddaten mitgeliefert werden. Darüber hinaus gestattet es die Integration eines Digitalen Geländemodells in den Prozess der geometrischen Transformation. Mangels höher auflösender Geländedaten musste auf das ATKIS DGM25 zurückgegriffen werden. Somit konnte der Forderung nach Höhengenaugigkeiten unter 1m (ERDAS FIELD GUIDE, 2001) nicht entsprochen werden. Die Ergebnisse der Referenzierung sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tab. 2: Ergebnisse der Passpunktentzerrung der Quickbird-Szene

	Quickbird Pan	Quickbird MS
Projektion/ Ellipsoid/ Datum	Transverse Mercator/ Bessel/ Potsdam/ Zone 4, 12° East	
Transformationsgleichung	Polynom 2.Ordnung	
Resampling Methode	Bikubische Interpolation	Verfahren der Nächsten Nachbarschaft
Pixel Größe	0,8	3,0
Anzahl der Passpunkte	38	40
RMSError (Total)	0,9 (0,7 m)	0,1 (0,4 m)
RMSError (Min.)	0,2 (0,2 m)	0,04 (0,1 m)
RMSError (Max.)	1,1 (0,8 m)	0,2 (0,6 m)

Anhand 23 gleichverteilter Messpunkte wurde die passpunktentzerrte panchromatische Szene im Anschluss hinsichtlich ihrer Lagetreue überprüft. Die Kontrolle der Multispektralaufnahme erfolgte anhand 21 gleichverteilter Messpunkte. Die Ergebnisse zeigen eine mittlere Lageabweichung von 2 m und eine maximale Lageabweichung von

5,1 m bzw. 1,5 m für die panchromatische bzw. für die multispektrale Aufnahme. Bezüglich der geometrischen Genauigkeit der panchromatischen Aufnahme muss das Ergebnis als nicht gänzlich zufriedenstellend bezeichnet werden. Ein visueller Vergleich der entzerrten Quickbird-Szene mit dem Ortholuftbildmosaik zeigt zwar in den Kernbereichen der Aufnahmen eine gute bis sehr gute Übereinstimmung. In den Randbereichen kommt es jedoch teils zu erheblichen Abweichungen.

2.3 Zusatzdaten

Neben den vorgestellten Satellitenbilddaten standen für die Untersuchungen die Biotoptypen- und Landnutzungskartierung des Landes Sachsen als thematische Datengrundlage zur Landnutzung im Maßstab 1:10.000 zur Verfügung. Sie beruhen auf einer flächendeckenden CIR-Luftbildüberflieger in den Jahren 1992 und 1993.

3 Methoden

3.1 Segmentbasierte Auswertung

Mit dem Aufkommen neuer höchstauflösender Satellitenbilddaten seit Ende der 90-er Jahre wurde relativ schnell deutlich, dass herkömmliche pixelbasierte Methoden aufgrund der erhöhten spektralen Variabilität und des Rauschens innerhalb quasihomogener Objekte bei der Auswertung derartiger Bilder an ihre Grenzen stoßen (SCHIEWE et al., 2001). Neuere Ansätze schalten daher dem eigentlichen Klassifikationsprozess eine Segmentierung vor, in der benachbarte Bildelemente aufgrund von Homogenitäts- bzw. Heterogenitätsparametern zu Regionen bzw. Segmenten gleicher Wertähnlichkeit verschmolzen werden. Die so entstandenen Segmente bilden die Grundeinheiten der Klassifikation.

In der vorliegenden Arbeit kam mit dem in der Software eCognition implementierten „Fractal Net Evolution“-Ansatz (FNE) ein *Region Growing*-Verfahren zum Einsatz, bei dem mehrdimensionale Bildpixel auf beliebigen Betrachtungsebenen zu Objekten zusammengefasst werden, die in Form eines hierarchischen Netzwerkes vertikal und horizontal miteinander verknüpft sind (DEFINIENS IMAGING, 2002; BAATZ & SCHÄPE, 2000; BENZ et al., 2004). Jedes auf diese Weise entstandene Objekt verfügt neben einer Vielzahl spektraler und geometrischer Eigenschaften über umfangreiche Informationen zu Nachbarschaftsobjekten sowie zu hierarchischen über- und untergeordneten Objekten.

Die Klassifikation dieser Segmente erfolgte unter Verwendung eines *fuzzy logic*-Ansatzes ebenfalls innerhalb der eCognition-Umgebung. Mithilfe von Zugehörigkeitsfunktionen, die entweder auf der Basis von Trainingsflächen (Nearest Neighbour Klassifikator) oder aufgrund von Expertenwissen formuliert werden, kann ein beliebig komplexes Regelwerk aufgebaut werden, in dem für jede Klasse charakteristische Merkmale nachvollziehbar und transparent vorgehalten werden (Abb. 1).

Bereits erste Segmentierungstests machten deutlich, dass die Arbeit mit der Quickbird-Gesamtszene (ca. 11 x 11 km) aufgrund der enormen Datenmenge einige programm- und rechentechnische Probleme aufwirft. Aufgrund hoher Prozessierungs- und Visualisierungszeiten wurde für die Klassifikation der Quickbird-Daten nur ein ca. 4,2 x 3,9 km großer Ausschnitt im Zentrum der Gesamtszene gewählt. Vor Beginn der Untersuchungen wurden zudem unterschiedliche Eingangsdaten auf ihre Eignung für den Segmentierungsvorgang hin überprüft. Die besten Ergebnisse bezüglich der Abgrenzung von Landnutzungspartellen lieferte ein Fusionsbild aus panchromatischem und multispektralen Kanälen nach dem Local

Mean Matching Algorithm (BÉTHUNE et al., 1999). Als Zusatzdaten kam darüber hinaus die Biotoptypen- und Landnutzungskartierung des Landes Sachsen zum Einsatz.

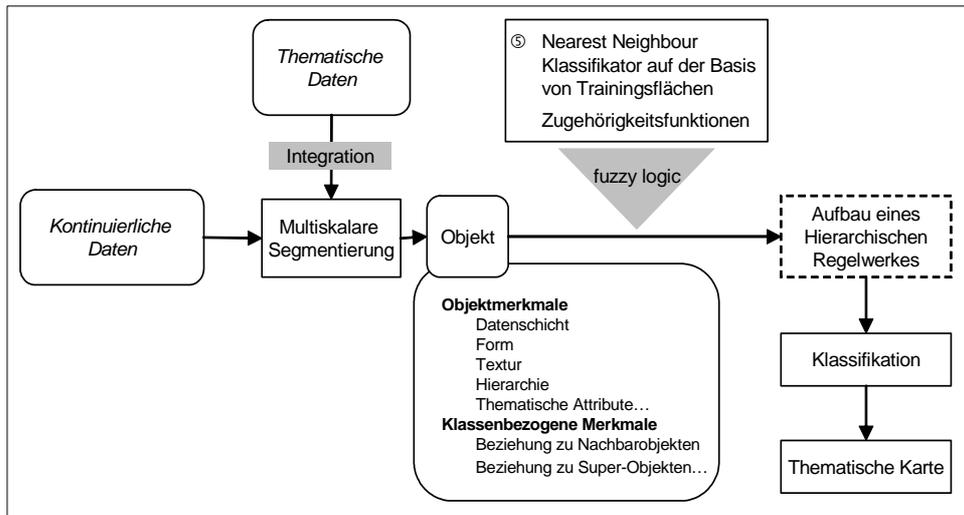


Abb. 1: Objektbasierte Klassifikation mit eCognition

3.2 Texturmerkmale

Neben spektralen und räumlichen Charakteristika von Objekten in Satelliten- oder auch Luftbildern ist die Textur ein ganz wesentliches Kriterium für die Erkennung bestimmter Objektarten und Sachverhalte. Unter Textur versteht man die räumliche Strukturierung einer Fläche in Abhängigkeit von deren Material- und Oberflächeneigenschaften (ALBERTZ, 2001). Die Erscheinung einer bestimmten Textur ist dabei eng an den Bildmaßstab, d.h. an die räumliche Auflösung von Bilddaten gebunden. So lassen sich die regelmäßig linienhaften Texturen bewirtschafteter Ackerflächen in panchromatischen Quickbird-Daten mit einer Bodenauflösung von mehr als 1m gut erkennen, wohingegen sie in einer panchromatischen Aufnahme des Landsat-Satelliten (15 x 15 m) zu einem einheitlichen Grauwert verschwimmen.

Für die vorliegenden Untersuchungen wurde die Textur eines Bildes in Form statistischer Parameter zweiter Ordnung, den sogenannten Grauwertabhängigkeitsmatrizen (GLC-Matrix) für die Detektion der Bodenbearbeitungsrichtung herangezogen. Eine GLC-Matrix ist die Schätzung der Übertrittswahrscheinlichkeit von einem bestimmten Grauwertniveau i auf ein anderes Grauwertniveau j zweier benachbarter Bildelemente. Die Nachbarschaft wird dabei durch einen Übergangsvektor definiert. Durch Analyse der lokalen Umgebung kann so für jedes Pixel eine GLC-Matrix berechnet und in der Folge ein Texturmerkmal abgeleitet werden, was die GLC-Matrix in einem einzigen Wert charakterisiert. Das Ergebnis dieses Vorgangs ist ein Texturmerkmalsbild (TMB), das die gerichtete texturale Eigenart des Ausgangsbildes ausdrückt. HARALICK et al. (1973) geben 14 derartiger Texturmerkmalsbilder an. Nach STEINNOCHER (1994) hat sich das „Inverse Difference Moment“ (IDM) für die Auswertung panchromatischer Satellitenbilder als vorteilhaft erwiesen. Daher werden die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen auf Basis des IDM erfolgen. Dabei ist es notwendig, dass Texturmerkmal in allen vier möglichen Orientierungsrichtungen (horizontal, vertikal, links- und rechtsdiagonal) zu ermitteln, um die gesamte texturale Eigenart eines Bildes zu erfassen.

Die Erstellung der Texturmerkmalsbilder aus dem panchromatischen Kanal der Quickbird-Szene erfolgte anhand von 5 C-Programmen. Die räumliche Distanz zwischen den benachbarten Pixeln wurde auf 3 festgelegt, so dass ein Objekt eine Mindestgröße von ca. 3 x 3 m (= 4 x 4 Pixel) aufweisen muss, um als homogen erkannt zu werden. Als räumliche Umgebung wurde ein 11 x 11 Fenster gewählt.

4 Untersuchungsgebiet

Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen ist ein ca. 4,2 x 3,9 km großer Landschaftsausschnitt nordöstlich der Stadt Leipzig (Sachsen), dessen rezentes Relief weitgehend Ergebnis der pleistozänen Überformung durch glaziale und periglaziale Prozesse im Quartär ist. Formenzeugen der glazialen Genese sind die nordwest-südöstlich verlaufenden flachhängigen Hügel der saaleiszeitlichen Tauchaer Endmoräne, die stellenweise beträchtliche Hangneigungen erreichen können (NEEF, 1960). Sie sind eng vergesellschaftet mit Grundmoränen des Saale-Elster-Komplexes sowie glazifluviatilen Sanden und Kiesen (KUGLER & VILLWOCK, 1995). Die periglaziale Lage in der letzten Eiszeit führte zu Aufwehungen von Löß (Sandlöß und Lößsand). Dieser stellt zugleich das vorherrschende Substrat der Bodenbildung dar. Als Hauptbodentypen im Untersuchungsgebiet sind heute Parabraunerden, Pseudogley-Parabraunerden, Braunerden und in den Niederungen Gleyböden verbreitet. Auf weiten Flächen des Untersuchungsgebietes herrscht eine intensive agrarische Nutzung vor (Abb. 2).

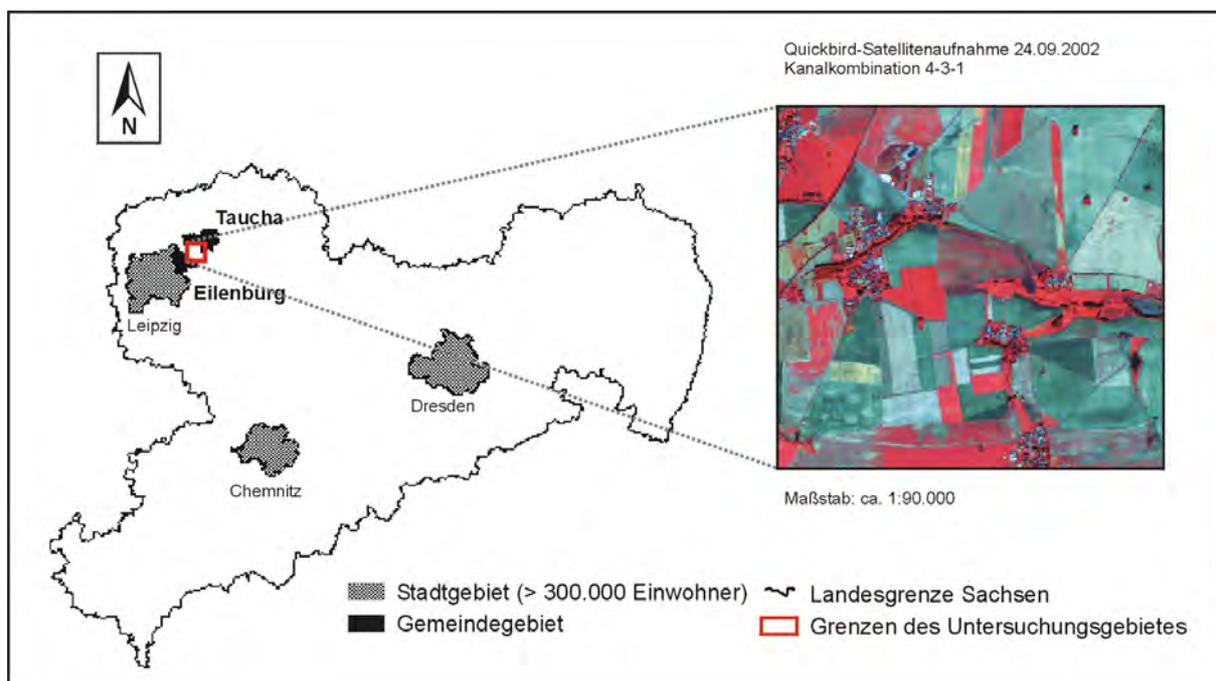


Abb. 2: Lage des Untersuchungsgebietes

5 Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 3 zeigt die methodischen Teilschritte für die Ableitung der Ackerschlaggrenzen und die Detektion der Bodenbearbeitungsrichtung. In einem ersten Klassifikationsschritt werden alle nicht ackerbaulich genutzten Flächen wie Grünland, Wasser, Siedlung etc. maskiert und damit von weiteren Analysen ausgeschlossen. Danach erfolgte in einem zweiten Klassifikationsschritt die detaillierte Betrachtung aller ackerbaulich genutzten Flächen.

Ergebnis dessen ist eine digitale thematische Schlagkarte, die durch den Export in ein Geographisches Informationssystem kartographisch aufbereitet und für weitere Anwendungen zugänglich gemacht werden kann. In einem neuen eCognition-Projekt werden die generierten IDM-Texturmerkmalsbilder auf Grundlage der Schlagkarte segmentiert. Durch die nachfolgende wissensbasierte Klassifikation dieser Segmente (Ackerschläge) lässt sich die Bodenbearbeitungsrichtung eines jeden einzelnen Ackerschläges bestimmen.

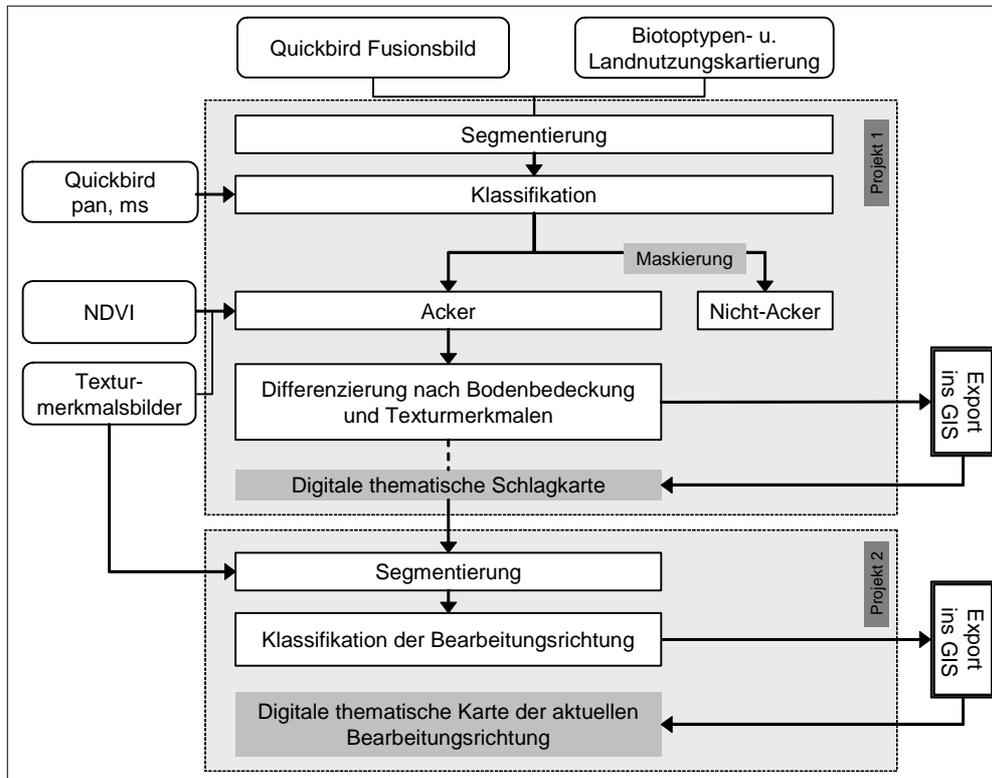


Abb. 3: Ablaufschema zur Detektion der Ackerschläge und zur Bestimmung der Bodenbearbeitungsrichtung aus Quickbird-Daten

5.1 Differenzierung der Ackerflächen und Ableitung der Ackerschlaggrenzen

Für die Erstellung der Ackermaske wurde aufbauend auf der Biotypen- und Landnutzungskartierung des Landes Sachsen eine Aktualisierung der Hauptflächennutzungen (z.B. Acker, Wald, Siedlung, etc.) vorgenommen, die eine Ausgrenzung der nicht ackerbaulich genutzten Flächen gestattete (GERIGHAUSEN, 2004). Innerhalb der Ackerflächen erfolgte sodann eine Differenzierung der einzelnen Schläge auf zwei Segmentierungsebenen. Da eine Trennung anhand der Feldfrüchte aufgrund des Aufnahmezeitpunktes der Quickbird-Szene (Mitte September) von vornherein ausschied, dienten der Grad der Bodenbedeckung sowie die texturale Charakteristik als Trennungskriterien. Auf der oberen Segmentierungsebene konnten zunächst fünf Ackerklassen anhand ihres Vegetationsindex (NDVI) unterschieden werden. Über das Attribut *Existence of super-objects* (DEFINIENS IMAGING, 2002) wurde sodann auf der unteren Ebene der Bezug zu diesen Flächen hergestellt und weitere Klassen durch Zugehörigkeitsfunktionen auf Basis der IDM-Texturmerkmalsbilder detektiert.

Nach Beendung des letzten Klassifikationsschrittes wurden das Ergebnis im Vektorformat exportiert und in ArcInfo/ArcView aufbereitet. Flächen gleicher Klassen-ID wurden zu-

sammengeführt. Flächen kleiner 0,2 ha wurden eliminiert. Das Ergebnis ist in Abbildung 4 veranschaulicht. Es können quasi alle Schläge in Form und Größe erfasst werden. Visuelle Überprüfungen haben gezeigt, dass die Grenzverläufe in der Regel weniger als einen Meter von der tatsächlichen Schlaggrenze abweichen. Problematisch für die Bildung kompakter Segmente zeigt sich indes lückiger Vegetationsbestand, was zu deutlichen Fehlern bei der Abgrenzung führt.

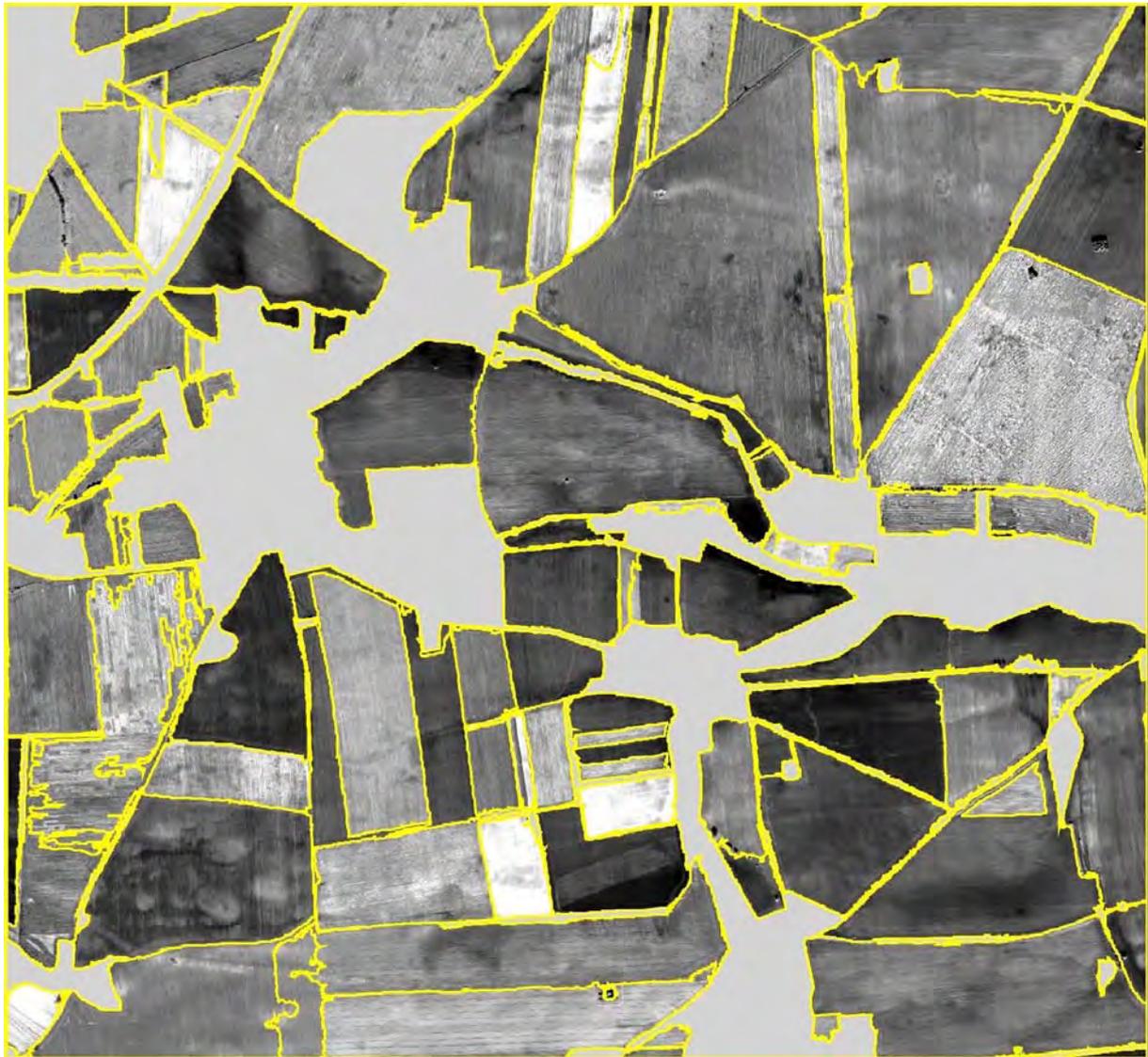


Abb. 4: Erzeugte Vektoren der Schlaggrenzen (gelb) abgebildet vor der panchromatischen Quickbird-Szene vom 24.09.02

Tabelle 3 fasst die Ergebnisse statistisch zusammen. Die Ackerflächen wurden nach Größenklassen in Zehnerschritten erfasst, wobei der größte Anteil durch Schläge mit einer Fläche zwischen 20-30 ha einnimmt. MEYER (1997) weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass im Untersuchungsgebiet nach 1958 im Rahmen der Flurbereinigung eine deutliche Parzellenvergrößerung stattgefunden hat, von durchschnittlich 1,35 ha auf ca. 14,3 ha. Die auf Basis der Quickbird-Szene ermittelte durchschnittliche Schlaggröße beläuft sich auf 12,5 ha.

Tab. 3: Größe der Ackerflächen nach Größenklassen ermittelt auf Basis von Quickbird-Satellitenbilddaten

Größenklassen	Anzahl der Schläge	Fläche gesamt (ha)	Durchschnittl. Größe (ha)
< 1ha	14	11,1	0,8
1 - 5 ha	35	90,5	2,6
5 - 10 ha	16	120,3	7,5
10 - 20 ha	16	211,6	13,2
20 - 30 ha	12	282,0	23,5
30 - 40 ha	7	236,5	33,8
40 - 50 ha	3	138,7	46,2
50 - 60 ha	0	0,0	0,0
60 - 70 ha	2	130,0	65,0
70 - 80 ha	0	0,0	0,0
80 - 90 ha	0	0,0	0,0
90 - 100	0	0,0	0,0
> 100	1	100,1	100,1
Gesamt:	106	1320,8	12,5

5.2 Detektion der Bodenbearbeitungsrichtung

Die Ergebnisse in Tabelle 4 zeigen, dass die Bearbeitungsrichtung eines Ackerschlaages in enger Beziehung zu den richtungsabhängigen Texturmerkmalsbildern der panchromatischen Aufnahme steht. Wie bereits STEINNOCHER (1997) feststellte, tritt für gerichtete Texturen wie Feldstrukturen in den GLC-Matrizen außer in der Richtung, die parallel zu den Kanten verläuft eine starke Streuung auf. Infolgedessen weist das IDM für diese Richtung einen signifikant höheren Wert auf als in den übrigen Richtungen. Somit ist davon auszugehen, dass das Texturmerkmalsbild mit dem größten mittleren Grauwert der Bodenbearbeitungsrichtung eines Schlaages entspricht.

Tab. 4: Richtungsabhängige Texturparameter (IDM) verschiedener Ackerschläge im Vergleich

Schlag-ID	Horizontal	Vertikal	Rechtsdiagonal	Linksdiagonal
1	135,21	227,99	163,55	158,86
2	242,07	144,06	171,67	175,73
3	179,41	159,90	233,43	179,73
4	176,66	153,88	195,99	183,90
5	249,04	190,75	229,88	225,27
6	33,55	42,36	34,11	61,91
7	169,50	182,20	186,09	219,05
8	154,37	217,17	177,77	180,69
9	62,19	105,40	68,63	68,3
10	238,11	166,47	200,99	206,57

In einem neuen Projekt werden zunächst die vier Texturmerkmalsbilder unter Einbeziehung der thematischen Schlagkarte mit einem hinreichend großen Skalierungsfaktor auf einer Ebene segmentiert. Jeder Ackerschlag entspricht so genau einem Objekt. Zudem sind alle ackerbaulich bzw. nicht ackerbaulich genutzten Flächen eindeutig über den thematischen Datensatz identifizierbar. Zur Beschreibung des obigen Sachverhaltes dienen nun sechs nutzerspezifische Merkmale, die die Differenzen der Mittelwerte der Texturmerkmalsbilder abbilden (Abb.5 (2)). Durch Kombination dieser Merkmale können anschließend die vier Klassen *Horizontale Bearbeitung*, *Vertikale Bearbeitung*, *Linksdiagonale Bearbeitung* und *Rechtsdiagonale Bearbeitung* eindeutig beschrieben werden (Abb.5 (3)). Dabei wird von der

Annahme ausgegangen, dass genau das TMB den größten Wert aufweist, welches für alle drei Differenzen positive Werte annimmt. Zum Beispiel wird ein Objekt als horizontal klassifiziert, wenn es für die Differenz aus den Mittelwerten des horizontalen und des linksdiagonalen TMB, des horizontalen und des rechtsdiagonalen TMB und für die Differenz aus den Mittelwerten des horizontalen und des linksdiagonal TMB's einen Wert größer Null liefert. Den vier Texturrichtungen wird ähnlich den Nordrichtungen eine Windrose zugrunde gelegt, aus der die Wertebereiche (Winkel) der vier Bearbeitungsrichtungen ablesbar sind.

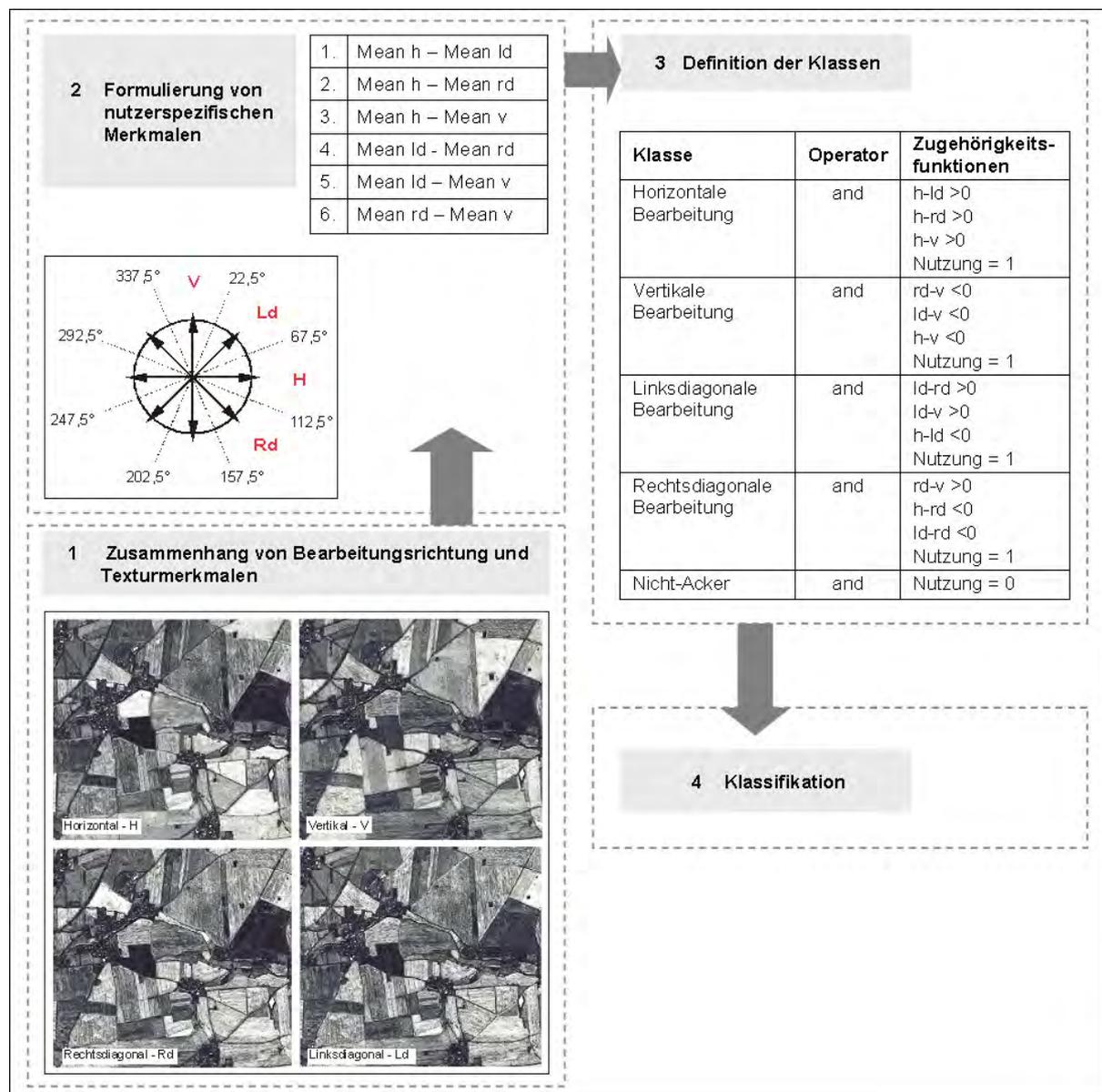


Abb. 5: Erstellung eines Regelwerkes zur Bestimmung der Bodenbearbeitungsrichtung in eCognition

Das Ergebnis des vorgestellten Verfahrensablaufes veranschaulicht Abbildung 6. Die Schraffuren sind so gewählt, dass sie die jeweilige Bodenbearbeitungsrichtung direkt repräsentieren. Die Überprüfung des Ergebnisses erfolgte mithilfe 200 zufällig verteilter Kontrollpunkte anhand des panchromatischen Satellitenbildes. Die erzielte Klassifikationsgenauigkeit beträgt 90 %. Wie Tabelle 5 verdeutlicht, ergaben sich insbesondere Schwierigkeiten bei der Unterscheidung der vertikalen Bearbeitungsrichtung von rechts- und

linksdiagonalem Verlauf. Derartige Verwechslungen sind einer gewissen Unschärfe der Übergangsbereiche geschuldet. Teilweise werden aber auch eindeutig zu einer Richtung zuordenbare Textur- bzw. Bearbeitungsrichtungen unterschiedlichen Klassen zugewiesen. Das geschieht genau dann, wenn die Textur im Bildmaterial aufgrund dichter Vegetationsbedeckung nur schwach ausgeprägt ist oder durch starke Reflexion auf unbestandenen Flächen beeinträchtigt wird. In Folge dessen weisen die Mittelwerte der Texturrichtungen nur sehr geringe Abweichungen auf. Die besten Ergebnisse konnten für horizontale Strukturen erzielt werden.

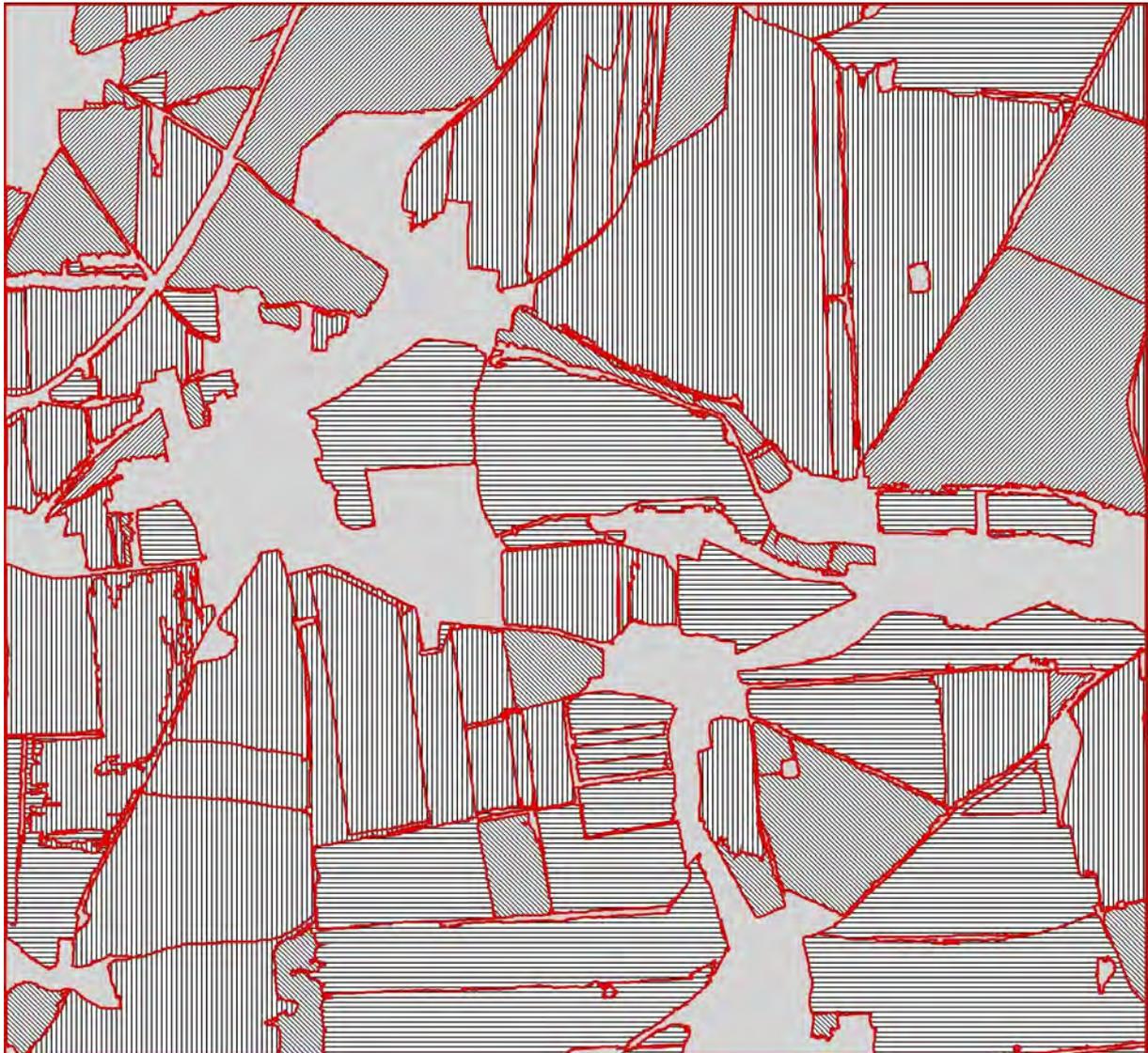


Abb. 6: Ergebnis der Klassifikation der Bodenbearbeitungsrichtung auf Basis von IDM-Texturmerkmalsbildern (Die Signaturen entsprechen der Bearbeitungsrichtung.)

Tab. 5: Fehlermatrix sowie Hersteller- und Nutzergenauigkeit der Klassifikation der Bodenbearbeitungsrichtung

Klasse		(1)	(2)	(3)	(4)	Herstellergenauigkeit (%)	Nutzergenauigkeit (%)
(1)	Horizontal	46	0	2	2	100,0	92,0
(2)	Linksdiagonal	0	43	2	5	97,7	86,0
(3)	Rechtsdiagonal	0	1	41	8	91,1	82,0
(4)	Vertikal	0	0	0	50	76,9	100,0
Gesamt		46	44	45	65	90,0	

6 Fazit und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde eine Methode zur automatischen Detektion von Schlaggrenzen und der Bodenbearbeitungsrichtung vorgestellt. Dabei erwies sich der angewandte *Region Growing*-Algorithmus der Software eCognition als zweckdienlich für die Detektion der Schlaggrenzen. Allerdings zeigte sich die Wahl des Skalierungsfaktors bzw. des Homogenitätskriteriums zur Erreichung eines optimalen Segmentierungsergebnisses problematisch, da diese mehr oder weniger in einem *Trial-&Error*-Prozess ermittelt werden müssen. Mithilfe eines hierarchischen Regelwerkes, bestehend aus Zugehörigkeitsfunktionen auf Grundlage des NDVI und der Textur, konnten anschließend alle Ackerflächen klassifiziert und in ihrer räumlichen Ausdehnung erfasst werden. Auf diese Weise lässt sich jeder Ackerschlag in seiner Lage, Größe und Form charakterisieren und kann als Bezugseinheit Eingang in die Modellierung der Stoff- und Wasserhaushaltes finden. Ebenso ließe sich auf diese Weise der Bedarf nach aktuellen Schlagkarten im Rahmen des EU-Agrarmonitoring decken. Die dafür zusätzlich erforderlichen Angaben zu Anbaufrüchten könnten durch multitemporale Analysen geringer aufgelöster und damit deutlich kostengünstigerer Satellitenbilddaten (z.B. Landsat) zugänglich gemacht werden.

Darauf aufbauend konnte auf der Basis von Texturmerkmalsbildern für jeden Ackerschlag die Bearbeitungsrichtung ermittelt werden. Die erzielte Klassifikationsgenauigkeit von 90% bestätigt die gute Funktionsweise der vorgestellten Methode.

Anliegen künftiger Arbeiten sollte es sein, die Übertragbarkeit und Praktikabilität der vorgestellten Methode auf andere Gebiete zu testen. Zur Zeit erweist sich in diesem Zusammenhang insbesondere die Rechenkapazität als limitierend auf die Größe und die Wahl des Untersuchungsgebietes.

Es stellt sich zudem die Frage, inwiefern diese neue Generation höchstauflösender Satellitendaten über den hier vorgestellten Rahmen hinaus einen Beitrag zur Gewinnung weiterer bodenkundlicher Standortparameter leisten kann, um das Defizit an aktueller und flächendeckender großmaßstäbiger Bodeninformation zu mindern (MEYER, 1999).

7 Literatur

ALBERTZ, J. (2001): Einführung in die Fernerkundung, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.

BAATZ, M. & A. SCHÄPE (2000): Multiresolution Segmentation: an optimization approach for high quality multiscale image segmentation. In: STROBL, J., BLASCHKE T. & G. GRIESEBNER [HRSG.] Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000: 12-23. Wichmann Verlag, Karlsruhe.

- BBODSCHG (1998): Umweltrecht. Deutscher Taschenbuch Verlag, 11. neubearbeitete und erweiterte Auflage. S. 181-194.
- BENZ, U.C., HOFFMANN, P., WILLHAUCK, G., LINGENFELDER, I. & M. HEYNEN (2004): Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. Vol. 58: 239-258.
- BÉTHUNE, DE S., MULLER, F. & M. BINARD (1999): Adaptive Intensity Matching Filters: A new tool for multiresolution data fusion. AGARD conference proceedings 595, Multi-Sensor Systems and Data Fusion for Telecommunications, Remote Sensing and Radar, Lisbon-Portugal, 29 September - 2 October 1997, 28-1-28-15.
- DEFINIENS IMAGING (2002): eCognition User Guide, München.
- DONNER, R., SCHMIDT, S. & D. WALTER (2002): Ableitung von Nutzungsparametern landwirtschaftlicher Flächen aus multitemporalen ETM-Daten. In: Blaschke, T. [Hrsg.] Fernerkundung und GIS. Neue Sensoren und innovative Methoden: 189-198. Wichmann-Verlag, Heidelberg.
- ERDAS FIELD GUIDE (2001): Fifth edition, revised and expanded. Erdas Imagine Inc., Atlanta.
- FOCKELMANN, R. (2001): Agricultural parcel detection with eCognition2.0. eCognition Application Note. Vol. 2, No. 10: 1-2.
- GERIGHAUSEN, H. (2004): Objektbasierte Standortcharakterisierung mit Methoden der Fernerkundung. Universität Potsdam, Institut für Geoökologie, Diplomarbeit, unveröff.
- HARALICK, R.M., SHANMUGAM, K. & I. DINSTEIN (1973): Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. Vol. SMC-3, No. 6: 610-621.
- KUGLER, H. & G. VILLWOCK (1995): Geomorphologie des mitteleuropäischen Raumes. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 77: 23-26.
- LUDWIG, B., BOIFFIN, J., CHADOEUF, J. & A.-V. AUZET (1995): Hydrological structure and erosion damage caused by concentrated flow in cultivated catchments. *Catena* 25: 227-252.
- MEINEL, G. & J. REDER (2001): IKONOS-Satellitenbilddaten – ein erster Erfahrungsbericht. *Kartographische Nachrichten* 51, 1: 40-46.
- MEYER, B. (1997): Landschaftsstrukturen und Regulationsfunktionen in Intensivagrarschaften im Raum Leipzig. Regionalisierte Umweltqualitätsziele – Funktionsbewertungen – multikriterielle Landschaftsoptimierung unter Verwendung von GIS. *UFZ-Bericht* 24/1997, Leipzig.
- MEYER, M., REICHE, E.-W. & I. DIBBERN (1999): Verfahren und Probleme der Parametrisierung am Beispiel der Bodenerosionsmodellierung. In: BLASCHKE, T. [HRSG.] *Umweltmonitoring und Umweltmodellierung: GIS und Fernerkundung als Werkzeuge einer nachhaltigen Modellierung*: 153-162. Wichman-Verlag, Heidelberg.

- NEEF, E. (1960): Die naturräumliche Gliederung Sachsens. Sonderdruck Sächsische Heimatblätter.
- SCHIEWE, J., TUFTE, L. & M. EHLERS (2001): Potential and problems of multiscale segmentation methods in remote sensing. GIS Geoinformationssysteme 14 (6): 34-39.
- SCHRÖDTER, M. & M. STEININGER (2000): Grundlagen für eine standortgerechte Bodenbewirtschaftung in Sachsen-Anhalt. In: Institut für Bodenkunde der Universität Hannover [Hrsg.]. Horizonte – Herrenhäuser Forschungsbeiträge zur Bodenkunde. Bd. 3: 157-162. Der Andere Verlag, Osnabrück.
- SCHWERTMANN, U., VOGL, W. & M. KAINZ (1987): Bodenerosion durch Wasser: Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. Stuttgart.
- STEINNOCHER, K. (1994): Methodische Erweiterung der Landnutzungsklassifikation und Implementierung auf einem Transputernetzwerk. Geowissenschaftliche Mitteilungen. Heft 40. Technische Universität Wien.
- STEINNOCHER, K. (1997): Texturanalyse zur Detektion von Siedlungsgebieten in hochauflösenden panchromatischen Satellitenbilddaten. In: Dollinger, F. & J. Strobl Angewandte geographische Informationsverarbeitung IX = Salzburger Geographische Materialien. Heft 26: 143-152. Selbstverlag des Instituts für Geographie der Universität Salzburg.
- SOUTH, S. QI, J. & D. P. LUSCH (2004): Optimal classification methods for mapping agricultural tillage practices. Remote Sensing of Environment 91: 90-97.
- TOUTIN, T. & P. CHENG (2002): Quickbird – a Milestone for high resolution mapping. EOM. Vol. 11, No. 4: 14-18.
- VIÑA, A., PETERS, A. J. & L. JI (2003): Use of Multispectral Ikonos Imagery for Discriminating between Conventional and Conservation Agricultural Tillage Practices. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 69, No.5: 537-544.
- WASSENAAR, T., ROBBEZ-MASSON, J.-M. & P. ANDRIEUX (2002): Vineyard identification an description of spatial crop structure by per-field frequency analysis. International Journal of Remote Sensing, Vol. 23, No. 17: 3311-3325.

Erfassung und Analyse von Prüfkörpern in der Materialprüfung durch Computertomographie

MATTHIAS SCHULZE¹, UWE HAMPEL²

Zusammenfassung: Die Computertomographie stellt ein bildgebendes Verfahren dar, das im Gegensatz zur Nahbereichsphotogrammetrie geeignet ist, innere Strukturen eines Objektes zu erfassen und zu analysieren. Ausgehend von den physikalischen und technischen Grundlagen werden die besonderen Eigenschaften der Computertomographie beschrieben, die für den Einsatz dieses Verfahrens und beim Aufbau der Versuchsanordnung zu berücksichtigen sind. Im Rahmen der Untersuchungen textilbewehrter Strukturen wird die Einsatzmöglichkeit der Computertomographie hinsichtlich der Erfassung von Fehlstellen, der Verfolgung von Rissstrukturen sowie der Lokalisierung von Dichte- und Strukturveränderungen beispielhaft aufgezeigt. Weitere Anwendungsgebiete stellen dynamische Untersuchungen dar, mit deren Hilfe Aussagen über die Verbundeigenschaften zwischen Betonmatrix und Roving getroffen werden können.

1 Einleitung

Bei der Computertomographie (CT) handelt es sich um ein digitales Bildgebungsverfahren, das neben anderen dreidimensionalen Volumenmessverfahren (Ultraschall, Magnetresonanztomographie -MRT, Positronenemissionstomographie - PET) die Bildaufnahme von der rein oberflächenbezogenen Fotografie in das Objektinnere erweitert. Der aus dem Griechischen abgeleitete Begriff Tomographie ("tomo" - Schnitt und "graphie" - aufzeichnen) beschreibt hierbei die zerstörungsfreie Erfassung einzelner Schichten, ohne das Objekt selbst aufschneiden zu müssen. Dazu wird das Untersuchungsobjekt mit Hilfe von Röntgenstrahlen durchleuchtet und der dabei entstehende Schatten als zweidimensionales Projektionsbild aufgezeichnet. Eine wiederholte Aufnahme des Objektes zu unterschiedlichen Drehwinkeln erlaubt die Ableitung des dreidimensionalen Objektvolumens aus dessen zweidimensionalen Projektionen unter Anwendung eines mathematischen Rekonstruktionsalgorithmuses (AVINASH & MALCOM, 1999).

Für die Überprüfung der mechanischen Eigenschaften der im Rahmen des Sonderforschungsbereiches (SFB) 528 entwickelten textilbewehrten Betonstrukturen werden Verfahren der Nahbereichsphotogrammetrie und der CT eingesetzt (CURBACH, EDITED, 2003). Während die Verfahren der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie bei der Erfassung bautechnischer Untersuchungen bereits erfolgreich eingesetzt werden, hat sich die CT, anders als in der Medizin und Werkstoffprüfung, im bautechnischen Mess- und Versuchswesen noch nicht durchsetzen können. Dies ist vor allem auf die besonderen Eigenschaften der CT zurückzuführen, die es erfordern, eine spezielle Anpassung der Probengeometrie und der experimentellen Anordnung im Gesamten vorzunehmen. Um photogrammetrische Auswertetechniken auf computertomographische Bilddaten anwenden zu können, müssen ähnlich der Photogrammetrie "Anhaltepunkte" in Form von Struktur oder Marken existieren. Da aufgrund von Artefakten und dem allgemein ungünstigen Signal-Rausch-Verhältnis von CT-

¹ Dipl.-Ing. Matthias Schulze, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01062 Dresden, e-mail: matthias.schulze@mailbox.tu-dresden.de

² Dipl.-Ing. Uwe Hampel, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01062 Dresden, e-mail: uwe.hampel@mailbox.tu-dresden.de

Aufnahmen mit natürlichen Strukturen nur bedingt Subvoxelgenauigkeit erreicht werden kann, müssen künstliche Markierungen eingesetzt werden.

Anliegen dieser Arbeit ist es, die CT als ein dreidimensionales Messverfahren mit seinen physikalischen und technischen Eigenschaften vorzustellen und dabei einerseits auf die Besonderheiten, die sich im Zusammenhang mit der bild- und messtechnischen Auswertung ergeben, einzugehen und andererseits das Potential dieser Messmethode darzustellen.

Der Beitrag gliedert sich in folgende Punkte. Im sich anschließenden Abschnitt 2 wird der physikalische Hintergrund der CT beschrieben. In Abschnitt 3 wird das Potential dieses Messverfahrens an Beispielen aus dem bautechnischen Versuchswesen verdeutlicht und in Abschnitt 4 abschließend bewertet und zusammengefasst.

2 Grundlagen der Computertomographie

2.1 Der theoretische Hintergrund

Im Gegensatz zum Licht, das die Grundlage der Fotografie darstellt, können Röntgenstrahlen aufgrund ihrer kürzeren Wellenlänge und höheren Energie in feste Materie eindringen und sie teilweise durchdringen. Wellenlängen zwischen 10^{-8} bis 10^{-16} Metern kennzeichnen im elektromagnetischen Spektrum den Bereich der Röntgenstrahlung. Neben der in der Medizin eingesetzten "weichen" Strahlung werden für die Materialforschung auch wesentlich kürzere bzw. "härtere" Wellenlängen verwendet.

Die Schwächung der Röntgenstrahlen beim Durchgang durch ein Objekt bildet die Grundlage dieses Verfahrens und stellt gleichzeitig die eigentliche Messgröße dar. Neben dieser Röntgenabsorption kann bei Verwendung kohärenter Strahlung zusätzlich die Phasenverschiebung als Röntgenphasenkontrast genutzt werden, um bei Objekten mit geringen Dichteunterschieden durch Hinzunahme der Phaseninformation den Strukturkontrast zu verbessern.

Ein Röntgenbild gibt wieder, in welcher Weise ein Probekörper die ihn durchdringende Strahlung abschwächt (Absorptionskontrast) oder verlangsamt (Phasenkontrast). Eine solche Projektion enthält die Summe der Absorptionsdichte des Objektes entlang des Röntgenstrahls. Die Dichteverteilung parallel zum Strahl wird dabei gemittelt und geht somit verloren, so dass übereinander liegende Strukturen gegenseitig verdeckt werden. Erst mit der Aufnahme mehrerer Projektionen zu unterschiedlichen Drehwinkeln und deren anschließende rechnerische Zusammenführung ermöglicht die überlagerungsfreie Darstellung innerer Strukturen. Das Ergebnis liefert einen Volumendatensatz, dessen einzelne Volumenelemente (Voxel) die lokale Absorption bzw. den Schwächungskoeffizienten μ angeben.

Die mathematische Grundlage bildet die Radon Transformation, die besagt, dass ein dreidimensionales Objekt eindeutig aus dessen zweidimensionalen Projektionen bestimmt werden kann. Dies gilt eindeutig nur für den kontinuierlichen Fall. Für den diskreten Fall, der durch begrenzte Bildauflösung und endliche Projektionsanzahl bedingt ist, bildet die Radon Transformation nur eine Näherung. Daraus ergibt sich, dass die Rekonstruktion um so vollständiger ist je feiner die Bildraasterung und je größer die Anzahl der Projektionen sind (TOFT, 1996).

2.2 Die praktischen Besonderheiten der Computertomographie

Die Vorteile der CT sind weder in ihrer zeitlichen noch ihrer räumlichen Auflösung zu suchen, sondern in der Möglichkeit, Objekte ungestört und zerstörungsfrei im Inneren zu beobachten und somit bei Materialuntersuchungen Strukturen und Phänomene auch unter der Objektoberfläche zu erfassen.

Bevor konkrete Anwendungen vorgestellt werden, soll auf die besonderen Eigenschaften der CT eingegangen werden, die beim Einsatz dieses Verfahren zu beachten sind.

Bei der CT handelt es sich um ein stationäres Bildgebungsverfahren, das es im Allgemeinen nicht erlaubt, Messungen direkt an der bautechnischen Versuchsanlage durchzuführen, so dass Versuch und Messung getrennt voneinander ablaufen oder der Versuchsaufbau an den Tomographen anzupassen ist.

Im Gegensatz zur Photogrammetrie, bei der von Objekten nur der Untersuchungsbereich aufgenommen werden muss, ist es bei der CT erforderlich, dass in allen Projektionsrichtungen das Objekt vollständig aufgenommen wird. Weiterhin muss die Probe und der gesamte Versuchsaufbau im Röntgenstrahl frei drehbar sein, und der Probekörper darf während der gesamten Drehung nicht verdeckt werden. Eine rotationssymmetrische Probengeometrie ist hierbei vorteilhaft. Die geometrische Auflösung ist direkt abhängig vom Abstand Objekt-Röntgenquelle und wird somit vom Objektdurchmesser bestimmt. Für herkömmliche Tomographen, die mit einem 1024x1024 CCD-Chip arbeiten, bedeutet dies ein Verhältnis geometrischer Auflösung und Objektdurchmesser von 1/1000. Bei der heutzutage erreichbaren Auflösung von 1µm entspricht dies einem Objektdurchmesser von nur noch 1mm. Auflösungen von 5µm bis 10µm sind daher für bautechnische Untersuchungen realistisch.

In Abhängigkeit von der Stärke der Strahlenquelle wird der Objektdurchmesser bei dichten Materialien wie Beton nach oben durch die Probendicke begrenzt.

Die mit Synchrotronstrahlung am ESRF (European Synchrotron Radiation Facility, Grenoble, Frankreich) aufgenommene Aufnahme (Abb. 1 links) hat eine Auflösung von 5µm. Kohärente Strahlung kann aber nur an Synchrotronanlagen erzeugt werden und fällt aufgrund der hohen Kosten für viele Anwendungen aus. Der an der TU Dresden am Institut für Werkstoffwissenschaften zur Verfügung stehende Tomograph ist wesentlich leistungsschwächer und erreicht dagegen nur eine Auflösung von 25µm (Abb. 1 rechts).

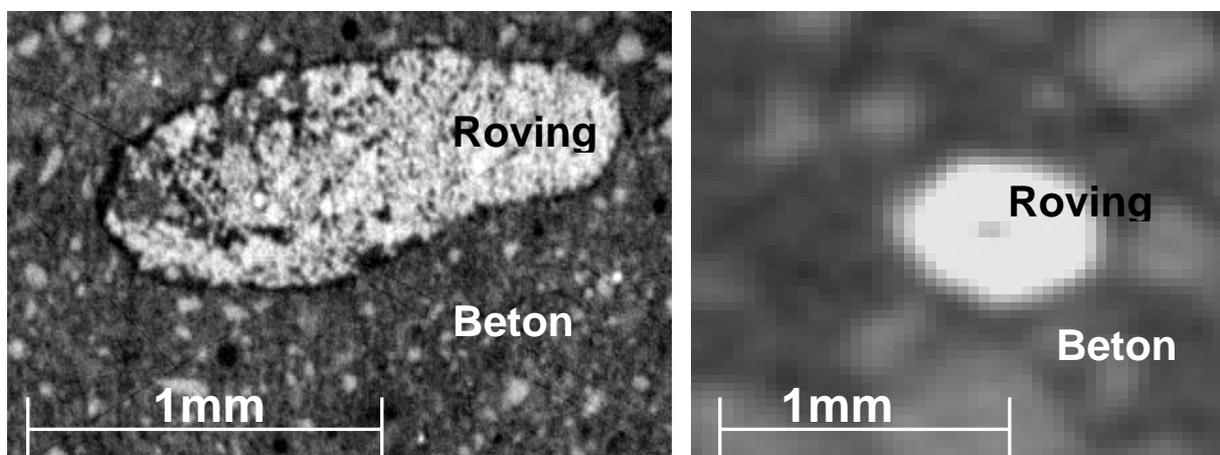


Abb. 1 : Auflösungspotential

Aufgrund der Mehrfachaufnahme zu unterschiedlichen Drehrichtungen beträgt die Messzeit einer einzigen CT-Aufnahme etwa 20 bis 60 Minuten. Die Messzeit ist einerseits abhängig von der Belichtungszeit pro Projektion (mehrere Sekunden), die direkt von der Leistung der Strahlenquelle und der mittleren Objektdichte bestimmt wird und andererseits von der Anzahl der zu messenden Projektionen (bis zu 1440), die ihrerseits für die geometrische Auflösung des rekonstruierten Volumens verantwortlich sind. Zeitlich kontinuierlich ablaufende Vorgänge können somit nicht beobachtet werden. Darüber hinaus muss beachtet werden, dass während der gesamten Messzeit das Messobjekt äußerlich wie innerlich vollkommen stabil und konstant bleibt, da sich die einzelnen Projektionen auf ein und das selbe Objekt beziehen und anschließend zu einem dreidimensionalen Volumen vereinigt werden. Bruchvorgänge und die Entstehung von Rissen können deshalb mit dem Messverfahren der CT nicht unmittelbar beobachtet werden, sondern nur die Situation vor und nach einem dynamischen Ereignis.

Um photogrammetrische Untersuchungen durchführen zu können, muss ein Objekt ähnlich wie bei optischen Aufnahmen ausreichend Struktur aufweisen oder eindeutig identifizierbare Merkmale besitzen. Kennzeichnend für CT-Aufnahmen sind ihre Struktur- und Kontrastschwäche, die aufgrund von Artefakten und dem ungünstigen Signal-Rausch-Verhältnis eintritt. Ausschlaggebend für den Strukturkontrast ist - abgesehen vom Phasenkontrast - die Absorptionsdifferenz hinsichtlich der Röntgenstrahlung, die vorrangig von der Dichte abhängt. Eine Markierung muss, um sich von ihrer Umgebung abzuheben, einen großen Dichteunterschied zu ihr aufweisen.

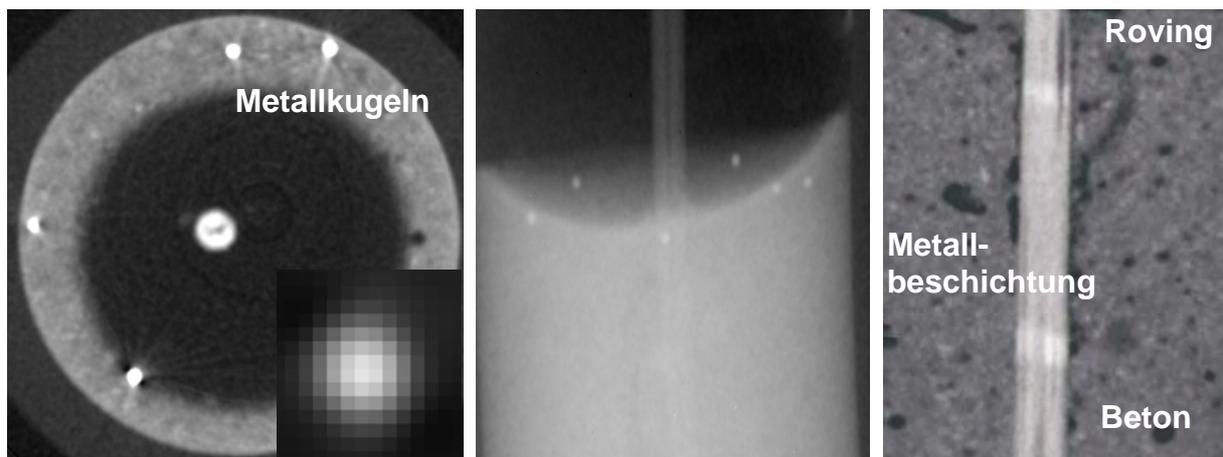


Abb. 2 : Beispiele für Markierungen in der Computertomographie

Eine besondere Herausforderung stellte die Markierung der Filamente dar, deren Verschiebung zueinander beobachtet werden soll. Eine Auflösung von $5\mu\text{m}$ ist zwar ausreichend, Einzelfilamente mit einem Durchmesser von $13.5\mu\text{m}$ sichtbar zu machen, aber im Verbund des Rovings sind aufgrund gleicher Dichte diese nicht mehr voneinander zu trennen und werden als eine einzige große Struktur abgebildet. Um Verschiebungen der inneren zu den äußeren Filamenten sichtbar machen zu können, wurde eine Metallbeschichtung der Filamente vorgenommen. Die Markierung wurde im Millimeterabstand strichweise quer zur angenommen Verschiebungsrichtung aufgebracht (Abb. 2 links).

Eine grundlegende Aufgabe der Markierung besteht in der Zuordnung zweier zeitlich getrennter Aufnahmen eines Objektes. Das Ein- oder Anbringen kleiner Metallkugeln mit einem Durchmesser von 0.2 bis 0.4 mm (Abb. 2 rechts) stellt eine gute Möglichkeit dar, da eine

Kugel bei dreidimensionalen Aufnahmen von jeder Richtung aus die gleiche Form und damit einen eindeutigen Punkt darstellt. Größere Kugeln liefern zwar eine größere Matchinggenauigkeit, wirken sich aber störend im Bild aus, da sie aufgrund ihrer hohen Dichte kaum Strahlung durchlassen und es regelrecht zu Abschattungen im Bild kommt. Allgemein bedeuten Markierungen zwar eine Einschränkung im bildtechnischen und experimentellen Sinne, wenn sie wie im Fall der Beschichtung die mechanischen Eigenschaften beeinflussen, die Markierung muss jedoch so umfangreich sein, damit sie im Tomogramm eindeutig erkennbar ist (CURBACH, EDITED, 2003).

In vielen Fällen kann die zweidimensionale Bildbearbeitung direkt unter einfacher Hinzunahme der dritten Dimension auf die voxelorientierte Bildbearbeitung angepasst werden. Beispiele hierfür sind einfache Filter, Kreuzkorrelation und zum Teil auch Kleinst-Quadraten-Anpassung (LSM) (ATKINSON, EDITED, 1996).

3 Einsatzgebiete der Computertomographie

Im bautechnischen Versuchswesen können mit den Einsatz der CT Fragestellungen über das Objektinnere beantwortet werden und daraus bestimmte Materialeigenschaften und Phänomene direkt erfasst werden.

Die Dichteverteilung eines Körpers und deren Veränderung sind unmittelbar aus einem Tomogramm ablesbar, da die Absorptionseigenschaften vorwiegend von der Dichte abhängen. Darüber hinaus ist die Lokalisierung und Quantifizierung von Fehlstellen und Rissen, sowie deren Verfolgung im Objekt möglich. Das Verhalten an Grenzschichten (zwischen Alt- und Neubeton) oder die Verbundproblematik (zwischen Roving und Betonmatrix) sind ebenfalls denkbare Einsatzfelder dieses Messverfahrens.

3.1 Statische Anwendungen

Strukturanalysen des Objektinneren stellen ein Anwendungsgebiet der CT dar. Fehlstellen im Beton können als Folge von Lufteinschlüssen und anderen unerwünschten Stoffanlagerungen auftreten und beispielsweise an Grenzschichten zu einer Verringerung der Kontaktfläche führen oder an besonders beanspruchten Bereichen eine Verminderung der Festigkeit hervorrufen. Da im Tomogramm diese Bereiche deutlich hervortreten, kann ihre Extrahierung unter Anwendung einfacher Schwellwertverfahren und Segmentierungs-

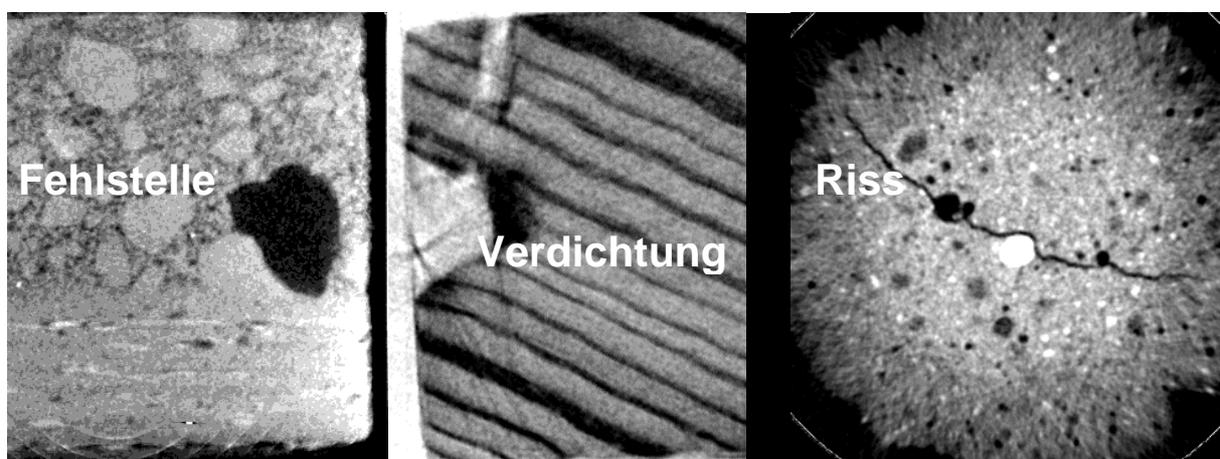


Abb. 3 : Anwendungsbeispiele der Computertomographie

algorithmen erfolgen (Abb. 3 links). Für die Ermittlung des Kontakt-Fehlstellen-Verhältnisses ist darüber hinaus die Berechnung der Kontaktfläche erforderlich.

Auf ähnliche Weise können auch in Holzkörpern Dichte- und Strukturveränderungen bestimmt werden. Die Stärken der CT in der direkten Dichtebestimmung veranschaulicht Abbildung 3 Mitte. Die durch mechanische Belastung hervorgerufene Verdichtung des Materials ist im Tomogramm deutlich zu erkennen. Dies wäre auch bei Aufschneiden der Probe mit optischen Verfahren nicht möglich.

Risse können ein frühzeitiges Kennzeichen für Materialschwäche und bevorstehendes Versagen sein. Die Ausbreitung der Rissstruktur im Körperinneren steht hierbei im Mittelpunkt des Interesses. Ihre Verfolgung, auch im Inneren, hilft bei deren Erfassung und Analyse. Im vorliegenden Beispiel (Abb. 3 rechts) wurden ähnliche Verfahren der Bildverarbeitung angewendet wie für die Fehlstellenanalyse. Zusätzlich können auftretende Lücken mittels Hough-Transformation überbrückt werden. Eine Verfolgung von Rissen im Ein- oder Subpixelbereich gestaltet sich aufgrund schlechter Bildqualität als unsicher.

3.2 Dynamische Anwendungen

Ein wichtige Fragestellungen hinsichtlich der Entwicklung textilbewehrter Betonstrukturen ist das Verbundverhalten zwischen Roving und Betonmatrix. Ein Glasfaser-Roving setzt sich aus mehreren tausend einzelnen Glasfaserfilamenten zusammen. Im eingebetteten Zustand stehen nur die Randfilamente im direkten Kontakt mit der Betonmatrix. In der Theorie wird davon ausgegangen, dass bei Belastung die Kräfte durch Reibung zwischen den einzelnen Filamenten vom Rand auf die im Kern befindlichen Filamente übertragen werden (Abb. 4). Da die mechanischen Eigenschaften des Roving unmittelbar von der Kraftübertragung abhängen, werden verschiedene Roving-Beschichtungen (Schlichte) entwickelt, die die Reibung zwischen den Filamenten erhöhen und so eine Verschiebung der Kernfasern möglichst verhindern. Wie sich diese Filamentverschiebungen im Detail während der Belastung verhält, soll mittels CT bestimmt werden.

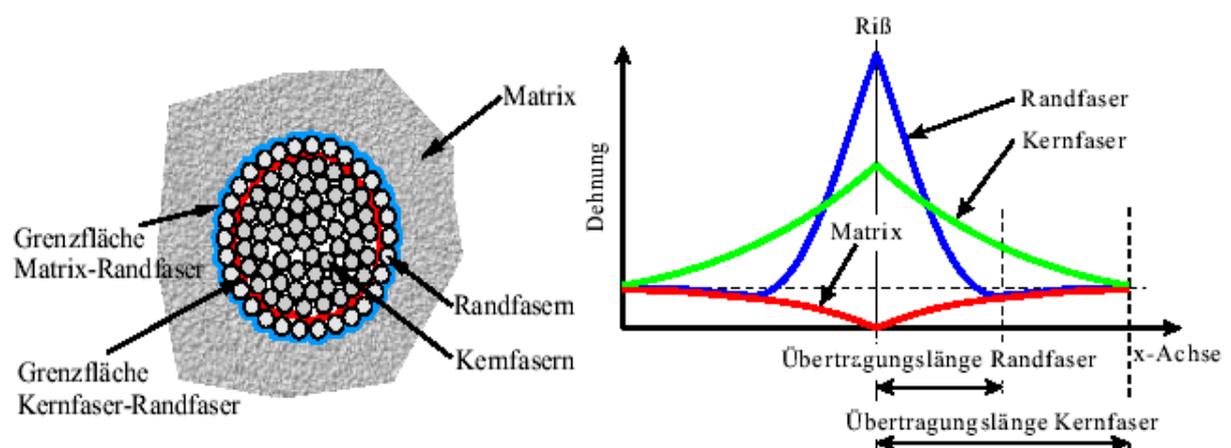


Abb. 4 : Modell der Kraftübertragung zwischen Betonmatrix und Roving (Curbach, M., 2001)

Als Grundlage für die computertomographische Untersuchung der Verbundeigenschaften dient der Roving Pull-Out-Versuch. Hierfür wird ein einzelner Roving, der zuvor mit

millimeterbreiten Metallquerstrichen bedampft wurde, in einen Betonzylinder von 8mm Durchmesser eingebettet. In fünf Laststufen von 10 bis 100N wird der Roving mit Zug belastet. Nach dem Anfahren einer Laststufe treten noch Kriecherscheinungen im Körper auf, so dass erst nach dem Einstellen einer konstanten Kraft die CT-Messung begonnen wird. Für jede dieser Laststufen wird ein Tomogramm aufgenommen.

In der anschließenden Auswertung werden die Aufnahmen miteinander verglichen und eine Verschiebungsanalyse der Filamente mit Hilfe der Rovingbeschichtung durchgeführt. Zuerst werden die Aufnahmen mit Hilfe von Metallkugeln zueinander orientiert. Die Kugeln werden im Tomogramm automatisch gefunden, über Streckenvergleich einander zugeordnet und subpixelgenau mittels 3D-Kleinst-Quadraten-Anpassung in Übereinstimmung gebracht. Aus den zueinander orientierten Datensätzen kann anhand der Strichmarkierung die Filamentverschiebung im Roving erfasst werden.

Die aufgeführten Anwendungen beziehen sich immer nur auf geometrische und zeitabhängige Stichproben von statischen und dynamischen Vorgängen. Mit Hilfe geeigneter statistischer Verfahren oder durch Verknüpfung mit anderen bildgebenden Messverfahren kann auf die Gesamtheit geschlossen werden.

3.3 Weitere Anwendungen

Die lange Messzeit stellt insbesondere für dynamische Anwendungen die größte Einschränkung dar. Diese kann neben der Einschränkung des Messbereiches bei Verzicht auf die dritte Dimension mittels der Verwendung der Projektionen umgangen werden. Dies setzt voraus, dass die Dreidimensionalität für die Untersuchungen nicht benötigt wird. In diesem Fall beträgt die Messzeit wenige Sekunden.

Da diese Methode keine Rekonstruktion erfordert, braucht auch nur der Untersuchungsbereich aufgenommen werden und erreicht damit eine entsprechend höhere Auflösung. Anwendungsbeispiele wären hier die kontinuierliche Zugbelastung eines Roving aus der Betonmatrix (Abb. 5 links) und Materialeinschlüsse (Abb. 5 Mitte) oder Dichte- und Strukturänderungen (Abb. 5 rechts) in Holzkörpern.

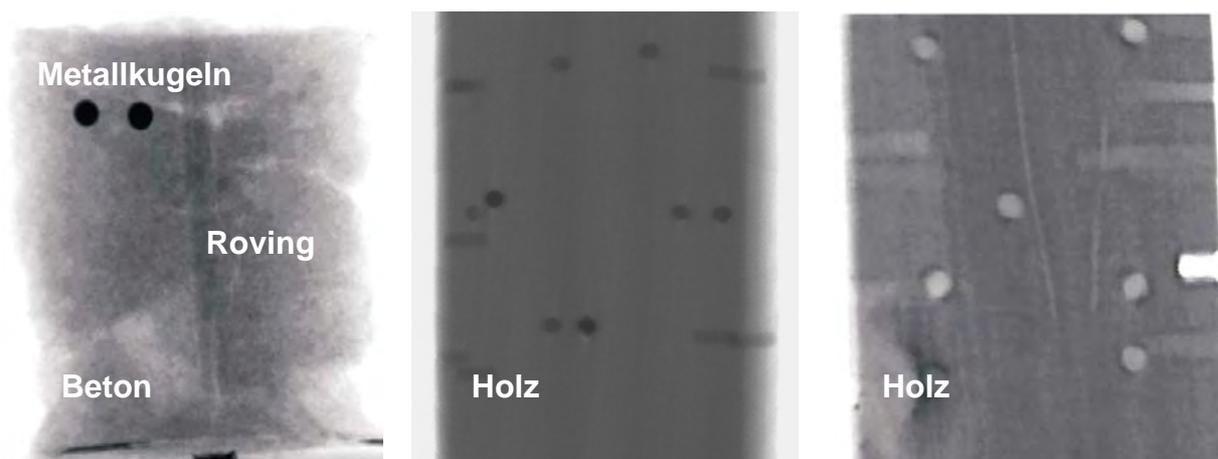


Abb. 5 : Projektionen

4 Fazit

Die CT stellt ein geeignetes Messverfahren dar Strukturen und Phänomene im Inneren eines Objektes zu beobachten. Da es sich bei der CT um einen dreidimensionalen auf Voxel basierenden Bilddatensatz handelt, müssen auch die Bildverarbeitungsalgorithmen voxelorientiert ausgelegt sein.

Die Untersuchungen müssen aufgrund der besonderen Eigenschaften der CT an das Messverfahren angepasst werden. So können von großen Untersuchungskörpern nur Stichproben genommen werden und von dynamischen und kontinuierlich ablaufenden Prozessen nur Zeitpunkte erfasst werden. Daraus ergibt sich, dass weitere Forschungen für den effektiv und praktikabel Einsatz der CT im Zusammenhang mit baumechanische Untersuchungen erforderlich werden.

5 Literaturverzeichnis

- AVINASH, C. K., MALCOM, S., 1999: Principles of Computerized Tomographic Imaging. IEEE PRESS, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York.
- TOFT, P., 1996: The Randon Transformation – Theory and Implementation, PhD Theis, Department of Mathematical Modelling, Technical University of Denmark.
- ATKINSON, K. B. EDITED, 1996: Close Range Photogrammetry and Machine Vision, Department of Photogrammetry and Surveying, University College London.
- CURBACH, M. EDITED, 2002: DFG Sonderforschungsbereich 528, Textile Bewehrung zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung, Arbeits- und Ergebnisbericht für die Periode II/1999-I/2002, Technische Universität Dresden.
- CURBACH, M. EDITED, 2003: CTRS2 Textile Reinforced Structures, Proceedings of the 2nd Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2), Technische Universität Dresden.

Einsatz einer Highspeedkamera zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern in Gasströmungen

TORSTEN PUTZE¹

Zusammenfassung: Der Beitrag gibt einen Überblick über die Verwendung von 3D Particle Tracking Velocimetry zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern in Gasströmungen. Im Besonderen soll auf die Verwendung von nur einer Kamera zur Generierung von multiokularen Aufnahmen unter Zuhilfenahme eines Strahlteilers eingegangen werden. Weiterhin wird ein Überblick über die Konzeption der Aufnahmeconfiguration und die Einsatzgebiete gegeben. Die maximal zu bestimmenden Strömungsgeschwindigkeiten sind dabei vor allem von der möglichen Beleuchtung, den verwendeten Partikel und der radiometrischen Empfindlichkeit der Kamera abhängig.

1 Einleitung

Es gibt verschiedene Verfahren, mit denen sich Geschwindigkeitsfelder in Strömungen bestimmen lassen. Dabei handelt es sich um Punktmessverfahren wie Laser Doppler Anemometrie, Hitzedrahtanemometrie oder die Messung mit Drucksonden. Flächige Messungen werden mit Particle Imaging Velocimetry (PIV) durchgeführt. All diese Messungen weisen eine räumlich oder zeitlich beschränkte Auflösung auf; die Ergebnisse repräsentieren einen mittleren Zustand im Strömungsgebiet. Particle Tracking Velocimetry (PTV) ist ein Verfahren, welches in einem Messvolumen Trajektorien der Strömung, repräsentiert durch Tracer, bestimmt. 3D-PTV beruht auf der Objektkoordinatenbestimmung von Partikeln in der Strömung, aufgenommen durch ein Mehrkamerasystem, und der spatio-temporalen Zuordnung der Partikel zwischen den einzelnen Epochen. Die Zuordnungen ergeben für jedes Partikel 3D-Bewegungsbahnen im Messvolumen.

In Zusammenarbeit des IPF mit dem Institut für Luft- und Raumfahrt der TU Dresden wird ein solches Messverfahren entwickelt. Die multiokularen Bildsequenzen werden mit einer Hochgeschwindigkeitskamera FASTCAM ultima 1024 und einem Prismensystem aufgenommen. Die Messungen können in einem Saugkanal mit etwa 50 x 50 cm² Messquerschnitt oder in einem Windkanal Göttinger Bauart mit einem Durchmesser von 3m durchgeführt werden.



Abb. 1: Hochgeschwindigkeitskamera FASTCAM ultima 1024.

2 3D PTV – 3D Particle Tracking Velocimetry

Das 3D PTV ist eine flexible Technik zur Bestimmung von zeitaufgelösten, räumlichen Geschwindigkeitsfeldern. Diese werden durch geeignete Partikel visualisiert (vgl. 3.3). Durch die Aufnahme und Auswertung einer Bildsequenz können Partikelbahnen rekonstruiert wer-

¹ Dipl.-Ing. Torsten Putze, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden, Helmholtzstraße 10, 01062 Dresden, E-Mail: torsten.putze@mailbox.tu-dresden.de

den. Eine relativ lange Beobachtungsdauer ermöglicht es, Informationen über Schwankungsgrößen in instationären Strömungen zu erhalten.

Zur Bestimmung der 3D Koordinaten aller Partikel zu allen Epochen muss eine Mehrbildauswertung durchgeführt werden. Hierzu können mehrere synchronisierte Kameras oder eine Kamera mit Strahlenteiler genutzt werden. Um eine umfassende Beschreibung des Geschwindigkeitsfeldes zu erhalten, werden viele Partikel in die vorhandene Strömung eingeführt. Um während der räumlichen Zuordnung die Mehrdeutigkeiten lösen zu können, reicht bei einer hohen Teilchendichte ein Stereoaufnahmesystem nicht mehr aus. Die Erweiterung auf ein 3- oder 4-Kamerasystem kann Mehrdeutigkeiten bei der Bildzuordnung lösen, und damit die Zuverlässigkeit steigern (MAAS 1992).

Der Erfolg der spatio-temporalen Zuordnung ist von der Komplexität der Strömung, der Anzahl der Partikel und der Bildrate der Kamera im Vergleich zur Strömungsgeschwindigkeit abhängig. Die Zuordnung kann zum einen in allen Bildern als ein 2D-Tracking und zum anderen im Objektraum als ein 3D-Tracking durchgeführt werden. Somit können Mehrdeutigkeiten gelöst und die Zuverlässigkeit erhöht werden. Ein iterativer Ansatz mit verschiedenen Methoden zur Bestimmung und Verbesserung der Geschwindigkeitsfelder vermeidet einen falschen Ansatz der Ausgangsströmung und somit eine nicht konvergierende Lösung.

Die Strömungsgeschwindigkeiten und die durchströmten Volumina sind nicht ausschlaggebend für die zu erreichende Genauigkeit. Ebenso ist das Verfahren nicht an ein bestimmtes Medium gebunden. Es lässt sich sowohl in Flüssigkeiten (MAAS 1992) als auch Gasen (MACHACEK 2002) realisieren. Der grundlegende Auswertalgorithmus kann für verschiedene Anwendungen adaptiert werden. Von großer Bedeutung sind jedoch die eingesetzten Hardwarebausteine. Die limitierenden Faktoren für die zu bestimmende Strömungsgeschwindigkeit sind die Bildrate und die Lichtempfindlichkeit der Kamera in Kombination mit der vorhandenen Beleuchtung.

3 Versuchsaufbau

3.1 Aufnahmesystem

Die Konfiguration des Aufnahmesystems ist stark abhängig vom Modell, an welchem die Strömung bestimmt werden soll. Auf der einen Seite ist für eine möglichst gute geometrische Konfiguration zu sorgen, auf der anderen Seite müssen Verdeckungen durch das zu messende Objekt vermieden werden. Ein wichtiger Punkt ist die Anordnung der Lichtquellen. Die Kamera darf nicht durch Streulicht und direktes Licht beeinflusst werden.

3.1.1. Strahlteileroptik

Wie oben erwähnt, ist ein Mehrkamerasystem notwendig. Die übliche Nutzung von mehreren Kameras hat bei der Aufnahme von Gasströmungen, die auf Grund ihres Geschwindigkeitsspektrums meist die Verwendung von Hochgeschwindigkeitskameras erfordern, entscheidende wirtschaftliche und technische Nachteile. Zum einen ist die Anschaffung mehrerer Hochgeschwindigkeitskameras sehr kostenintensiv. Zum anderen müssen mehrere Kameras synchronisiert werden, was nicht bei allen Hochgeschwindigkeitskameras möglich ist.

Eine Alternative zur Verwendung mehrerer Kameras ist die Nutzung einer einzelnen Kamera unter Zuhilfenahme eines Strahlenteilers. Hierbei werden mehrere Kameras simuliert, indem der Strahlengang einer Kamera direkt vor dem Objektiv aufgeteilt und umgelenkt wird (Abb. 2). Die oben angesprochenen Nachteile einer Synchronisation entfallen vollständig. Ebenso sind die Anschaffungskosten für ein Prismen-Spiegelsystem geringer als für zusätzliche Kameras. Ein Nachteil dieser Methode ist jedoch, dass auf einem Sensor mehrere Teilbilder (Abb. 3) abgebildet werden.

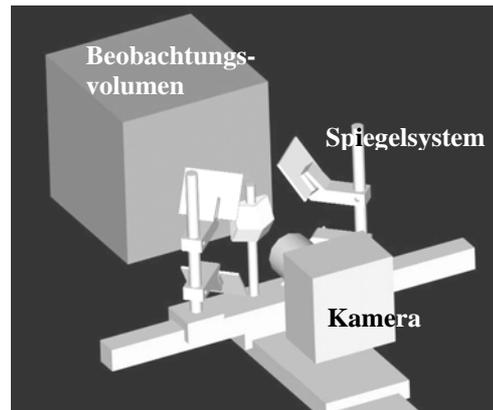


Abb. 2: Schema des Optiksystems (Klaus Hoyer, ETH Zürich).



Abb. 3: Aufnahme der Kamera (Bildformat 1024 x 512) über ein

3.1.2. Kamera

Neben dem Sensorformat der Kamera ist bei der Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern auch die zeitliche Auflösung von besonderer Bedeutung. Die Bildrate der Kamera hat entscheidenden Einfluss auf den Erfolg des Tracking. Je kleiner das Zeitintervall zwischen zwei Bildern ist, desto kleiner sind die Verschiebungen im Bild und im Objektraum. Weiterhin ergibt sich aus der Bildrate, der Größe des Beobachtungsfensters und der Strömungsgeschwindigkeit die Anzahl der Bilder, in denen ein Partikel abgebildet wird. Die Bewegungen der aufzunehmenden Objekte erzeugen eine Bewegungsunschärfe. Die sich bewegenden, runden Partikel werden als Streaks abgebildet, dessen Länge abhängig ist von der Geschwindigkeit und der Belichtungszeit.

Um eine zuverlässige zeitliche Zuordnung durchführen zu können, wird die Bildrate der Kamera auf ihr Maximum eingestellt. Die maximale Bildrate der Kamera bzw. die Auslesezeit des gesamten Sensors ist von der zugrunde liegenden Technologie abhängig. Bei der Verwendung von CMOS-Sensoren kann die Auslesezeit durch das Auslesen von Teilen des Sensors erhöht werden. Die einzelnen Bildelemente können unabhängig von deren Nachbarn

ausgelesen werden. Somit kann die maximale Fläche berechnet werden, die, korrespondierend zu einer gegebenen Bildfrequenz, ausgelesen werden kann. Eine höhere Bildrate lässt sich somit durch die Verkleinerung des aktiven Sensors erreichen. Bei der Nutzung des Prismenvorsatzes ist zu bemerken, dass die Erhöhung der Bildrate durch Verkleinerung der aktiven Sensorfläche nur eingeschränkt durchgeführt werden kann.

Um eine hohe Bildrate über eine längere Zeit (1000 – 4000 Bilder) zu erreichen, ist die Art des Zwischenspeichers von besonderer Bedeutung. Das Ablegen der einzelnen Bilder auf einem Festspeicher ermöglicht keine hohen Bildraten. Die Bilder werden kontinuierlich im Arbeitsspeicher zwischengespeichert und mittels Triggersignal vollständig auf einen Festspeicher kopiert.

Zur Vermeidung von Bewegungsunschärfen ist es bei einigen Kameramodellen möglich, neben der Bildwiederholrate die Belichtungszeit einzustellen. Extern kann dieser Effekt auch durch mechanische Shutter (Chopper) oder gepulstes Licht erzeugt werden. Begrenzt wird die Dauer der Belichtungszeit durch die radiometrische Empfindlichkeit des Sensors. Der Grauwert ist ein Maß für die Anzahl der Photonen, die während der Belichtungszeit auf das jeweilige Sensorelement gefallen sind. Je kürzer die Belichtungszeit ist, desto empfindlicher muss ein Sensor bei gleicher Beleuchtungsstärke sein. Der Umkehrschluss ist, dass die Partikel in der Strömung sehr hell beleuchtet werden müssen. Die Größe der Partikel kann nicht variiert werden (vgl. 3.3). Um die Beleuchtung von Volumen zu verstärken ist ein enormer technischer Aufwand zu betreiben. Für die praktische Anwendung bedeutet dies, dass ein Kompromiss zwischen Bildrate, Shutterzeit, Beleuchtung und Strömungsgeschwindigkeit gefunden werden muss. Durch die begrenzten technischen Möglichkeiten gibt es für jedes Aufnahmesystem eine maximal auswertbare Strömungsgeschwindigkeit.

Standardabweichung in μm	FASTCAM ultima 1024 1024 x 1024	Nikon D100 3008 x 2000
$\overline{\sigma_{BPM}^*}$	0,21	0,44
$\hat{\sigma}_0$	0,15 (1/80 Pixel)	0,40 (1/20 Pixel)
$\overline{\sigma_x}$	3,5	3,5
$\overline{\sigma_y}$	3,3	3,5
$\overline{\sigma_z}$	6,0	4,5

* Bildpunktmessung

Tab. 1: Vergleich FASTCAM ultima 1024 (Pixelgröße 12 μm) und Nikon D100 (Pixelgröße 7,8 μm)

Tabelle 1 enthält den Vergleich zwischen der FASTCAM ultima 1024 (60Hz) und der Nikon D100. Die Auswertung der Kalibrierung wurde mit dem 3D Studio von AICON durchgeführt. Eine Genauigkeitsuntersuchung der CMOS-Hochgeschwindigkeitskamera FASTCAM ultima 1024 zeigt, dass das Genauigkeitspotential der Kamera gleich dem von digitalen Spiegelreflexkameras ist.

3.2 Beleuchtung

Wie bereits beschrieben, ist die Bildwiederholrate der Kamera durch die Strömungsgeschwindigkeit vorgegeben. Variationen der Blende und der Belichtungszeit können nur begrenzt zur Steigerung der Objekthelligkeit im Bild genutzt werden. Einziger freier Parameter ist die Wahl der Beleuchtung. Die hohe Beleuchtungsstärke der Anlage ist ebenso wichtig wie die Möglichkeit, das Licht auf das Beobachtungsvolumen zu konzentrieren. Die Lampen müssen eine geringe Lichtstrommodulation aufweisen, um einem Flackern und somit verschiedenen Belichtungsbedingungen während der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen vorzubeugen. Für die Beleuchtungsrichtung gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die Beleuchtung kann frontal aus Richtung der Kamera erfolgen oder seitlich, senkrecht zur Aufnahme-richtung. Die zweite Anordnung hat den entscheidenden Vorteil, so dass Objekte, welche sich im Hintergrund befinden, nicht direkt angestrahlt werden und somit die Detektierung der Partikel nicht beeinflusst wird.

Für die vorliegende Aufgabe werden 1000W Halogenlampen genutzt, deren Glühwendeln durch Fresnellinsen leicht unscharf in der Messentfernung abgebildet werden. Damit lassen sich beispielsweise Volumina von $15 \times 15 \times 5 \text{ cm}^3$ gut ausleuchten. Durch eine seitliche Abschirmung der Lampen wird die Lichtausbeute erhöht und das Streulicht minimiert.

3.3 Tracer

An die physikalischen Eigenschaften der Partikel (Tracer), welche die Strömung visualisieren, werden besondere Anforderungen gestellt. Die Partikel sollen weder die Strömung noch durch ihre physikalischen Eigenschaften die eigene Bahn beeinflussen. Die Anforderungen können wie folgt beschrieben werden:

- Auftriebsneutral im Medium (Dichte des Materials)
- Verfolgung Komplexer Strömungen (Durchmesser der Tracer)
- Keine Trägheitseigenschaften (Masse der Tracer)
- Keinen Einfluss auf den Verlauf der Strömung (Größe und Form)
- Erkennbarkeit in den Kameraaufnahmen (Größe und Streueigenschaften)

Je nach umgebenem Medium und Beobachtungsvolumen müssen verschiedene Tracermaterialien verwendet werden. Dennoch lassen sich nicht alle dieser geforderten Eigenschaften realisieren. Geeignete Tracer zur Visualisierung in Flüssigkeiten mit einem relativ großen Beobachtungsvolumen lassen sich wesentlich einfacher herstellen als Tracer für Gasströmungen.

Neben den Eigenschaften der Tracer ist auch das Seeding (Einbringen der Tracer in die Strömung) von entscheidender Bedeutung. Die Apparatur darf mit ihren Ausmaßen die Strömung nicht beeinflussen und den Tracern keinen zusätzlichen Impuls geben. Damit die Strömung im gesamten Beobachtungsvolumen erfasst werden kann, müssen die Partikel so verteilt eingebracht werden, dass das gesamte Beobachtungsvolumen gleichmäßig durchströmt wird. Die Dauer und der Umfang der Durchströmung sind ausschlaggebend, ob und in wieweit instationäre Prozesse beschrieben werden können.

Für Strömungen in Flüssigkeiten eignen sich Kunststoffpartikel mit der jeweiligen Dichte, die oberhalb der Messstelle zugegeben werden. Diese sind in verschiedenen Größen und Dichten erhältlich. In MACHACEK & RÖSGEN (2002) wird für Gasströmungen die Nutzung

von Helium gefüllten Seifenblasen beschrieben. Diese haben die geeignete Dichte, sind jedoch schwieriger herzustellen. Die Sichtbarkeit kann durch die Füllung der Blasen mit flurorisierenden Stoffen verbessert werden. Alternativ werden Styroporkugeln mit einem Durchmesser von 0,5 mm genutzt. Hier ist aber vor allem durch die relativ hohe Masse ein unerwünschter Trägheitseffekt zu beobachten.

4 Auswertung von Bildmaterial

Die in Kapitel 4 gezeigten Auswertelgorithmen befinden sich noch in der Implementationsphase, so dass hier noch keine Endergebnisse gezeigt werden können.

4.1 Bildverarbeitung

Die aufgenommenen Bildsequenzen werden in mehreren Schritten verarbeitet, um als Ergebnis die Bildkoordinaten aller Partikel zu erhalten. Aus der gesamten Bildsequenz wird durch eine pixelweise zeitliche Histogrammanalyse das Hintergrundbild extrahiert und von den rohen Bilddaten subtrahiert. In diesen wird durch ein Region Growing Verfahren eine Segmentierung durchgeführt. Über ein Schwerpunktverfahren wird der grauwertgewichtete Mittelpunkt bestimmt.

In WIERZIMOK & HERING (1993) wurde gezeigt, dass der Schwerpunkt des Abbildes eines Objektes mit Bewegungsunschärfe der mittleren Position über die Belichtungszeit entspricht. Somit beeinflussen kleine Bewegungsunschärfen die Bildkoordinaten nicht. Aber diese Bewegungsunschärfen beinhalten Informationen über die Bewegungsrichtung und die Geschwindigkeit der einzelnen Partikel. Es ist noch zu prüfen, ob abgeleiteten Größen nur als Näherung für das Tracking oder eigenständig genutzt werden können.

4.2 3D-Koordinatenberechnung

Aus den durch Bildverarbeitung gewonnenen Bildkoordinaten aller Partikel in allen Bildern werden durch räumlichen Vorwärtsschnitt die Objektkoordinaten der einzelnen Partikel berechnet. Wie oben erwähnt, wird eine hohe Anzahl von Partikeln je Bild aufgenommen. Um dennoch eine eindeutige Zuordnung durchführen zu können, werden die Kernlinien des Mehrkameranensystems zu Hilfe genommen. Eine detaillierte Beschreibung dieses Verfahrens ist in MAAS (1992) nachzulesen.

Als Ergebnis dieser Berechnung werden Koordinatendatensätze gespeichert, die je Epoche zu jedem Partikel die Objektkoordinaten und die Bildkoordinaten aller Bilder beinhalten. Hieraus ergeben sich die Informationen der homologen Bildpunkte zu jeweils einer Epoche.

4.3 Tracking

Die Verknüpfung der einzelnen Partikel zwischen den einzelnen Epochen ergibt einen Pfad für jeden einzelnen Tracer und somit in der Gesamtheit einen Überblick über die Strömung. Grundlage hierfür ist die Koordinatendatenbank mit den Verknüpfungen von Bild- und Objektkoordinaten.

Die spatio-temporale Zuordnung kann sowohl im Bild- als auch im Objektraum durchgeführt werden. Die Verkettung der einzelnen Informationen wird iterativ durchgeführt, wobei ent-

weder der Bild- oder der Objektraum die Referenz darstellt und die jeweilig anderen Informationen die Entscheidungsfindung unterstützen (WILLNEFF 2003). Die Näherungslösung für die Zuordnung wird durch die Prädiktion der Bewegungsbahn bestimmt. Sind genügend Vorgängerepochen vorhanden, kann der Folgeort durch Beschleunigung, Geschwindigkeit, berechnet aus den Vorgängerepochen, und dem momentanen Ort extrapoliert werden. Ein Datenausfall von nur einer Epoche führt bei dem ersten Lösungsschritt dazu, dass keine Extrapolation durchgeführt werden kann. In diesem Fall ist ein mittleres Strömungsfeld, bestimmt durch abgeleitete Größen der Streaks und mittlere Werte der Nachbarschaft, die einzige Möglichkeit, die Näherungslösung für die Zuordnung zu finden.

Die Entscheidung nach der richtigen Zuordnung wird durch viele Bedingungen gestützt. Durch die spatio-temporale Zuordnung ist es möglich, iterativ Fehlzuordnungen aufzudecken. Für jeden Bild- und den Objektraum wird eine Zuordnung durchgeführt. Die richtige Zuordnung ist dann gegeben, wenn sich für jedes Partikel und zwei aufeinander folgende Epochen konsistente Daten ergeben. Im Umkehrschluss findet man zu einer richtigen Zuordnung in einem Bild- oder dem Objektraum die weiteren Verkettungen in der Datenbank (Abb. 4).

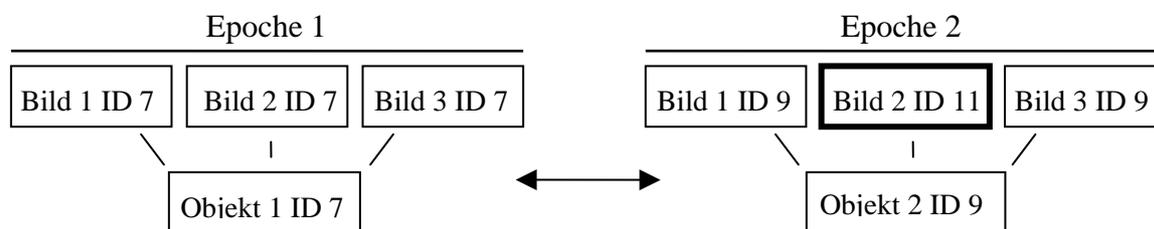


Abb. 4: fehlende Konsistenz der Zuordnung.

Zur weiteren Prüfung der Zuordnung können geometrische Größen genutzt und kombiniert werden. Je nach Anwendung eignen sich Abstände, Beschleunigungen, Grauwertsummen oder Größen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Artikel wurde ein photogrammetrisches Verfahren zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern in Gasströmungen dargestellt. Besonders im Vordergrund stand dabei die wirtschaftliche Nutzung einer einzelnen Kamera. Durch ein vorgeschaltetes Prismensystem ist es dabei möglich, multiokulare Aufnahmen zu erhalten. Je nach Anwendung muss das gesamte Aufnahmesystem auf die zu messende Strömungsgeschwindigkeit hin abgestimmt werden. Limitierender Faktor bei der Messung hoher Geschwindigkeiten und den draus zwingend erforderlichen kurzen Belichtungszeiten ist die Beleuchtung.

Grundsätzlich kann der Auswertalgorithmus der Bildsequenzen für verschiedene Anwendungen genutzt werden. Sowohl die zu erreichenden Genauigkeiten der Objektkoordinatenbestimmung als auch die Zuverlässigkeit des Trackings sind nicht von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig. Somit wird das relative Fehlermaß besser, je höher die Geschwindigkeiten sind.

Der Erfolg des Tracking ist abhängig von dem zurückgelegten Weg zwischen zwei Epochen. Je kleiner dieser ist, desto einfacher ist die Zuordnung. Werden viele Tracer beobachtet, die einen großen Abstand zwischen aufeinander folgenden Epochen haben, wird die Zuordnung

schwieriger. Hierfür muss ein genähertes Geschwindigkeitsfeld bekannt sein und die Bewegung der Teilchen möglichst genau beschrieben werden. Das Bewegungsmodell sollte jedoch nur wenige Parameter enthalten, damit die Initialisierungsphase zur Bestimmung der vollständigen Bahnparameter nicht zu viele Epochen in Anspruch nimmt.

6 Danksagung

Dieses Forschungsprojekt wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP 1147 „Bildgebende Messverfahren für die Strömungsanalyse“ gefördert. Für die Herstellung des Spiegelsystems danke ich Herrn Dr. K. Hoyer (IHW, ETH Zürich).

7 Literaturverzeichnis

- HERING, F. 1996: Lagrangesche Untersuchungen des Strömungsfeldes unterhalb der wellenbewegten Wasseroberfläche mittels Bildfolgenanalyse. Dissertation, URL: <http://klimt.iwr.uni-heidelberg.de/Projects/paper/doktor/doktor.html>, Zugriff 09.06.04.
- MAAS, H.-G., 1992: Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmesstechnik. Dissertation, ETH Zürich, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Nr. 50.
- MACHACEK, M. 2002: A Quantitative Visualization Tool for Large Wind Tunnel Experiments. Dissertation, ETH Zürich, Institute for Fluid Dynamics.
- MACHACEK, M.; RÖSGEN, T., 2002: A Quantitative Visualization Method for Wind Tunnel Experiments Based on 3D Particle Tracking Velocimetry (3D-PTV), PAMM, Proc. Appl. Math. Mech. 1.
- WIERZIMOK, D.; HERING, F., 1993: Quantitative Imaging of Transport in Fluids with Digital Image Processing, Imaging in Transport Processes, Begell House, pp 297-308, 1993.
- WILLNEFF, J., 2003: A Spatio-Temporal Matching Algorithm for 3D Particle Tracking Velocimetry, Dissertation, ETH Zürich, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie.

Topographische Geländeaufnahme mit terrestrischem 3D-Laserscanner

THOMAS P. KERSTEN¹, KLAUS MECHELKE² UND CHRISTIAN HÖNNIGER³

In diesem Beitrag wird der Einsatz des terrestrischen 3D-Laserscanning-Systems Mensi GS100/GS200 von Trimble im Fachbereich Geomatik an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg bei der topographischen Geländeaufnahme anhand von zwei Projekten vorgestellt. Die sächsische Ringwallanlage in Willenscharen (Schleswig-Holstein) wurde mit dem Mensi GS100 gescannt, um aus der gesamten Punktwolke einen Höhenlinienplan 1: 1000 abzuleiten. Außerdem wurde der Mensi GS200 zur beidseitigen Erfassung von ca. 1 km Uferböschungen der Tisza bei der Ortschaft Tiszavárkony (Ungarn) eingesetzt, um aus den Punktwolken ein digitales Geländemodell zu erstellen, das als Datengrundlage für Simulationsberechnungen von Überschwemmungen dienen soll. Die Qualität der aus den Laserscannerdaten modellierten digitalen Geländemodelle wird mit Referenzdaten verglichen und die Effizienz der Datenerfassung kritisch diskutiert.

1 Einleitung

Terrestrisches 3D-Laserscanning ist auf dem besten Wege, sich als 3D-Messtechnik neben und auch in Ergänzung zu den bekannten Technologien wie Photogrammetrie und Tachymetrie zu etablieren. Untersuchungen über Genauigkeiten und effizienten Einsatz sind aus diesem Grunde sowohl für das Verständnis und für die Verbesserung, als auch für eine breite Marktakzeptanz solcher Messsysteme sehr wichtig. Der Fachbereich Geomatik der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg hat in mehreren Projekten untersucht, in wie weit sich das terrestrische 3D-Laserscanning-System Mensi GS100 und GS200 bei der topographischen Geländeaufnahme effizient einsetzen lässt. Die Qualität der aus den Laserscannerdaten modellierten digitalen Geländemodelle wird mit Referenzdaten von Totalstationen verglichen.

Ergebnisse von Untersuchungen über das Genauigkeitspotenzial von verschiedenen Laserscannern wurden von der Fachhochschule Mainz (BÖHLER et al., 2003) publiziert. Dabei stellte sich heraus, dass die verschiedenen Scanner nicht unbedingt vernachlässigbare Fehler unter bestimmten Bedingungen zeigen. Weitere Untersuchungen und erste praktische Erfahrungen mit dem Mensi GS100/GS200 an der HAW Hamburg wurden von KERSTEN et al. 2004 veröffentlicht. MUCKE (2002) berichtet über eine topographische Aufnahme des Großsteingrabes Kleinenkneten II (Fläche 15 m x 12 m) mit dem Laserscanner Callidus, wobei die Verknüpfungen der einzelnen Scans einen Restfehler von ca. 6 mm lieferten.

Nach einer kurzen Vorstellung des 3D-Laserscanning-Systems Mensi GS100/GS200 im Kapitel 2 und einer Einführung in die Datenerfassung, Registrierung und Geo-Referenzierung mit dem Mensi-System im Kapitel 3 wird die Bearbeitung der beiden Projekte Ringwallanlage in Willenscharen und Uferböschungen der Tisza in Kapitel 4 und 5 präsentiert.

¹ Fachbereich Geomatik, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Hebebrandstr. 1, 22297 Hamburg, e-mail: t.kersten@rzc.haw-hamburg.de

² Adresse s. o., e-mail: k.mechelke@rzc.haw-hamburg.de

³ Adresse s. o., e-mail: c.hoenniger@rzc.haw-hamburg.de

2 Das Laserscanning-System Mensi GS100/GS200

Die 3D-Laserscanning-Systeme GS100 und GS200 werden von Mensi S.A., Frankreich hergestellt und bestehen aus Messinstrument mit Zubehör (Abb. 1) und entsprechender Erfassungs- und Auswertesoftware. Die technischen Spezifikationen der beiden Systeme sind in MENSIS 2004 zusammengefasst. Der wesentliche Unterschied zwischen GS100 und GS200 liegt in der Scan-Reichweite von bis zu 100 m bzw. 200 m als optimale Messentfernung. Der Panorama-View Scanner (360° horizontal, 60° vertikal) kann ein Messvolumen von 2 m x 2 m x 2 m bis 200 m x 200 m x 120 m abdecken. Die Auflösung des Scanners beträgt 0.002 gon (Hz/V). Ein Laserpunkt wird in 50 m Entfernung 3 mm groß abgebildet, wobei die Genauigkeit der Einzelstrecke 6 mm beträgt. Die Lasermessungen erfolgen mit grünem Laser (532 nm) der Klasse II und III nach dem Impulslaufzeitverfahren. Es können bis zu 5000 Punkte pro Sekunde gemessen werden.

Die Abb. 1 zeigt das 3D-Laserscanning-System Mensi GS100 mit Zubehör. Zum Scanner gehören eine robuste Transportkiste und ein Notebook zur Steuerung des Messinstrumentes bei der Datenerfassung. Eine sinnvolle Ergänzung des Systems ist ein effizienter Generator (z. B. Honda-Stromerzeuger EU 10i, Leistung ca. 1 KW) für den Betrieb im Außendienst, da nicht überall eine Stromversorgung vom Netz gewährleistet werden kann.



Abb.1: Das 3D-Laserscanning-System Mensi GS100 der HAW Hamburg mit Zubehör (links) und als Innenansicht mit digitaler Kamera und Spiegel (rechts)

Ein wesentlicher Bestandteil des Laserscanning-Systems ist die Software. Für die Datenerfassung wird PointScope (Version 1.2) als sogenanntes Außendienstprogramm eingesetzt, mit dem der Scanner gesteuert wird. Die anschließende Auswertung der 3D-Punktwolken erfolgt mit Real Works Survey (V4.1) oder mit 3Dipsos (V3.0). Beide Programme bieten neben der Registrierung bzw. Verknüpfung und Geo-Referenzierung der Punktwolken eine Vielzahl von Optionen für deren Auswertung. Real Works Survey erlaubt im Modul OfficeSurvey u.a. die Vermaschung der Punktwolken, die Berechnung von Volumina, die Ableitung von Höhenlinien und auch das Matching von digitalen Bildern mit der Punktwolke. Das Programm 3Dipsos stellt das Engineering Modul dar, mit dem CAD-Konstruktionen aus den Punktwolken erstellt werden können.

3 Datenerfassung, Registrierung und Geo-Referenzierung

Die wesentlichen Arbeitsschritte vor der eigentlichen Bearbeitung der 3D-Punktwolken sind die Datenerfassung, die Registrierung (Verknüpfung) und die Geo-Referenzierung der Punktwolken in ein übergeordnetes Koordinatensystem. Der Auf- und Abbau des Systems dauert

jeweils ca. 15 Minuten, während man für Aufnahmen auf einem Standpunkt je nach Detailreichtum ca. 1,5 Stunden benötigt. Um die gescannten Punktwolken verschiedener Standpunkte automatisch verknüpfen zu können, werden weiße Kugeln (Spheren) mit definiertem Durchmesser und/oder grüne Zieltafeln (Targets) im Objektraum gut verteilt platziert. Jede Kugel/jedes Target erfordert einen separaten Scan. Die Einstellung bzw. Suche dieser Kugeln und Zieltafeln erfolgt im Videobild der digitalen Kamera. Die Berechnung der Zentrumskoordinaten im lokalen Scannerstandpunktsystem erfolgt halbautomatisch: der Operateur ‚zeigt‘ durch einen Mausklick im Videobild dem Scanner das Ziel (Framing), danach wird eine Entfernungsmessung zum Ziel durchgeführt. Die Entfernung dient zur Festlegung des Scanbereiches und der notwendigen Auflösung. Anschließend scannt das System das Ziel, berechnet die Zentrumskoordinaten und zeigt das modellierte Ziel in PointScape an (siehe Abb. 2). Der Algorithmus arbeitet nicht immer zuverlässig. Je nach gemessener Strecke kann es sogar vorkommen, dass das System eine Kugel falsch in die Punktwolke approximiert (siehe Abb. 2 rechts). Die Zielerkennung wird umso schwieriger, je größer die Distanz zum Ziel ist. Ab einer Strecke von 100 m ist eine halbautomatische Erkennung i.d.R. nicht mehr möglich.

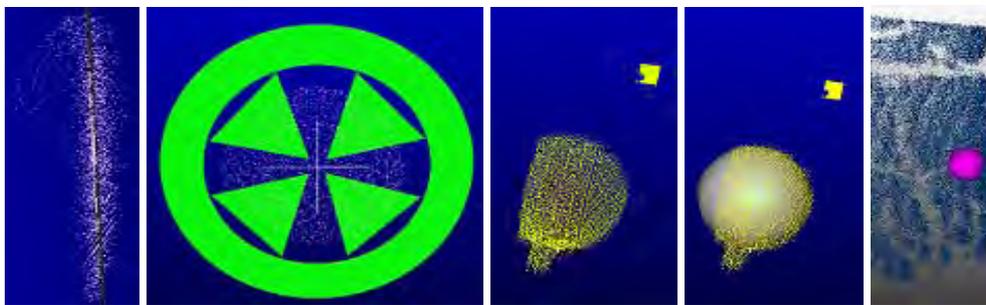


Abb. 2: Scan und automatische Erkennung einer Zieltafel (links) und Kugel (Mitte) mit PointScape. rechts: falsch approximierte Kugel in der Punktwolke eines Baumes.

Das Objekt kann anschließend ausschnittsweise oder als 360⁰-Scan mit unterschiedlichen Auflösungen (ab 0.3 mm auf 10 m) gescannt werden, wobei auch hier das Video Framing die Festlegung des Ausschnittes unterstützt. Die anschließende Registrierung der Punktwolken kann über die Kugeln oder Zieltafeln automatisch erfolgen, jedoch besteht auch die Möglichkeit, die Punktwolken über die Kugeln/Zieltafeln halbautomatisch oder über diskrete Punkte der Punktwolken manuell miteinander zu verknüpfen. Falls die Zieltafeln oder auch Kugeln (bei einer Zwangszentrierung auf einem Stativ) geodätisch in einem übergeordneten Koordinatensystem eingemessen wurden, können die Punktwolken über diese Punkte georeferenziert werden.

4 Topographische Aufnahme einer sächsischen Ringwallanlage

An vier Tagen im Dezember 2003 und Januar 2004 wurde die sächsische Ringwallanlage (9./10. Jahrhundert) in Willenscharen, Schleswig-Holstein (Abb. 3) mit dem GS100 von sechs Aufnahmestationen aus bei minimaler Belaubung gescannt, um aus der gesamten Punktwolke einen Höhenlinienplan 1: 1000 abzuleiten und die Ergebnisse mit einer tachymetrischen Aufnahme hinsichtlich Genauigkeit und Effizienz zu vergleichen. Zur Verknüpfung der Scans wurden im Objektraum 17 gut verteilte Kugeln gescannt, wobei acht Kugeln auf bekannten Punkten eines geodätischen Netzes standen, um eine Geo-Referenzierung der registrierten Punktwolke zu erreichen. Das geodätische Netz wurde mit einem Leica-Tachymeter TDA 1105 eingemessen. Dabei wurde nach der Netzausgleichung eine Koordinatengenauigkeit von besser als 5 mm erreicht. Die Registrierung der einzelnen Punktwolken

erfolgte in Real Works Survey (RWS) je nach Standpunkt über 3-7 Kugeln mit einem durchschnittlichen und maximalen Abstand der Kugelmittelpunkte von 7 mm und 10 mm, was für eine topographische Auswertung mehr als ausreichend ist. Die Geo-Referenzierung der registrierten Punktwolken erfolgte über drei gut verteilte Passpunkte mit einer Genauigkeit von 4 mm. Durch die Verwendung von sechs Passpunkten hätte man eine Genauigkeit von 36 mm erreicht, was für eine topographische Geländeaufnahme auch ausreichen würde.



Abb. 3: Ringwallanlage Willenscharen in Schleswig-Holstein (Ansicht von Süden)

Für die Erstellung der Höhenlinien wurde die Vegetation in der gesamten Punktwolke in RWS durch manuelle Arbeit (ca. 20 h) aufwendig eliminiert. Anschließend wurden aus der segmentierten Punktwolke Höhenlinien als 2D-Polylinien erzeugt und in AutoCAD Land Development bearbeitet, um ggf. Ausreißer manuell zu eliminieren und die Höhenlinien zu glätten. Eine wesentlich effizientere Methode stellt die automatische Filterung der Punktwolke in Boden- und Vegetationspunkte mit der Software TerraScan von Terrasolid Ltd. dar (siehe Abb. 4). So können innerhalb kürzester Zeit (ca. 1 h) aus der segmentierten Punktwolke der Bodenpunkte geglättete Höhenlinien generiert und in Microstation dargestellt werden.

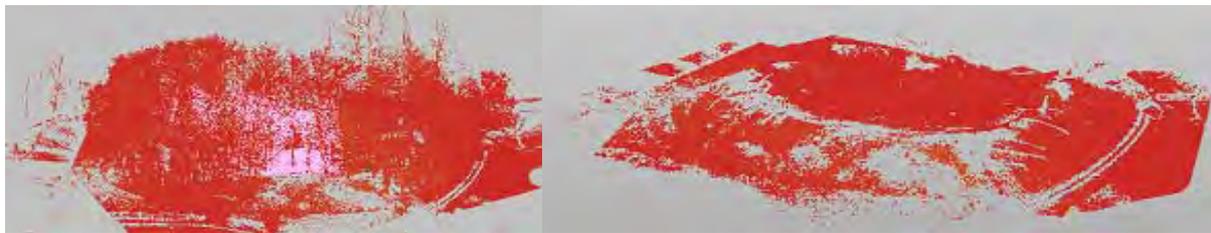


Abb. 4: Punktwolke der Wallanlage mit (links) und ohne Vegetation (rechts, Ansichten von Süden)

Um die Qualität der Laserscannerdaten beurteilen zu können, wurde die Ringwallanlage bereits im Oktober 2003 tachymetrisch mit dem Leica TDA 1105 aufgenommen. Insgesamt wurden mit dem Tachymeter 548 charakteristische Punkte des Wallberges an vier Tagen erfasst. Die drei generierten Höhenlinienmodelle (tachymetrisch, Laserscanning mit Real Works Survey und AutoCAD, Laserscanning mit TerraScan) wurden anhand von 23 tachymetrisch bestimmten Kontrollpunkten überprüft. Für alle drei Datensätze beträgt die gemittelte Differenz (Absolutwerte) an den Höhenkontrollpunkten ca. 0.2 m (siehe Tab. 1) und die Differenzen variieren maximal zwischen -0.70 m bis $+0.95$ m für die Auswertung der Laserscannerdaten mit RWS.

	Kontrollpunkte	Abs. Δh [m]	Differenzen [m]
Tachymetrie	23	0.23	-0.27 bis +0.77
Laserscanning + man. Ausw. (Real Works Survey)	23	0.16	-0.70 bis +0.95
Laserscanning + auto. Ausw. (TerraScan)	23	0.19	-0.25 bis +0.63

Tab. 1: Genauigkeitsuntersuchungen der Höhenlinien im Projekt „Laserscanning Willenscharen“

Eine visuelle Überprüfung erfolgte durch die Überlagerung der digitalen Höhenlinien (siehe Abb. 5). Dabei zeigten sich beim Vergleich der Höhenlinien nur kleine Unterschiede in einigen Bereichen der Wallanlage. Weitere Untersuchungen zur Genauigkeit der digitalen Geländemodelle sind zur Zeit noch in Bearbeitung.

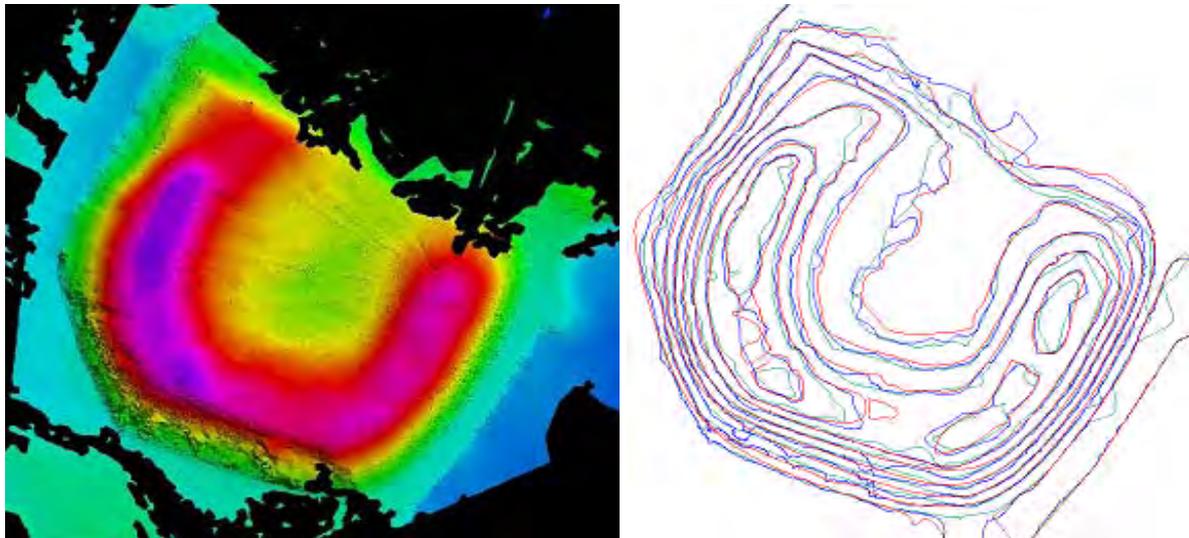


Abb. 5: Darstellung der durch TerraScan gerenderten Dreiecksvermaschung mit farbkodierten Höhenwerten, (links), generierte 1m-Höhenlinien im Vergleich (tachymetrisch grün, TerraScan blau, Real Works Survey rot)

In der Tab. 2 ist der zeitliche Aufwand für die Projektbearbeitung der tachymetrischen und der Laserscanner-Aufnahme der Wallanlage zusammengefasst. Es zeigt sich bei diesem Projekt, dass das Laserscanning nur bei einer automatischen Auswertung der Punktwolken genauso effizient wie die tachymetrische Aufnahme ist.

	3D Netz [h]	Aufnahme [h]	Auswertung [h]	Kontrolle [h]	Σ [h]
Tachymetrie	40	28	8	1	75
Laserscanning + man. Ausw.	40	24	36	1	101
Laserscanning + auto. Ausw.	40	24	9	1	74

Tab. 2: Zeitlicher Aufwand für die Projektbearbeitung „Laserscanning Willenscharen“

Detaillierte Informationen über das Projekt Willenscharen, das als Machbarkeitsstudie für die generelle Erfassung sächsischer Wallanlagen in Schleswig-Holstein dient, sind in HÖNNIGER (2004) zusammengefasst.

5 Topographische Aufnahme der Tisza-Uferböschungen

In Zusammenarbeit mit dem Celler Ingenieurbüro RMK Vermessung wurde der Mensi GS200 zur beidseitigen Erfassung von ca. 1 km Uferböschungen der Tisza bei der Ortschaft Tiszavárkony (Ungarn) im Dezember 2003 eingesetzt, um aus den Punktwolken ein digitales Geländemodell zu erstellen. Das DGM dient als Datengrundlage für Simulationsberechnungen von Überschwemmungen, die regelmäßig durch den im Osten Ungarns gelegenen Fluss Tisza verursacht werden. Daraus sollen Schutzmaßnahmen gegen Überschwemmungen abgeleitet werden, da einige Häuser wegen der ausgespülten steilen Uferböschungen abzurutschen drohen.



Abb. 6: Mensi GS200 im Einsatz am Fluss Tisza (links), Kartenausschnitt des Projektgebietes bei Tiszavárkony (Mitte) und der Scanner in der rutschigen und lehmigen Uferböschung

Die Uferböschungen der Tisza (Abb. 6) wurden an drei Tagen von neun Stationen aus bei Temperaturen knapp über dem Gefrierpunkt aufgenommen, wobei insgesamt 17 Kugeln auf bekannten Punkten (Stativ) für die Verknüpfung und Geo-Referenzierung der Punktwolken im nationalen ungarischen Koordinatensystem zusätzlich gescannt wurden. Die durchschnittliche Punktdichte der Scans betrug 50 mm und die gescannten Distanzen lagen im Durchschnitt im Bereich von 200 m. Es wurden sogar Strecken bis zu 330 m gemessen. Jedoch wurde später realisiert, dass die Kombination von Scannergewicht (ca. 13 kg) und morastigem Untergrund (Abb. 6) ein leichtes Einsinken des Instrumentes beim Messen verursacht, was zu Abweichungen bei der Registrierung und Geo-Referenzierung der Punktwolken führt. Die Kugeln konnten bei einer Entfernung von über 100 m nicht automatisch erkannt werden, so dass durch zusätzliche Scans und nachträgliche Rekonstruktion der Kugeln zusätzliche manuelle Arbeit erforderlich war. In diesem Projekt wurde keine Registrierung der Scans durchgeführt, sondern die Verknüpfung der Punktwolken erfolgte indirekt durch die Georeferenzierung jedes einzelnen Scans. Nach Transformation der Kugeln in das nationale ungarische Koordinatensystem ergab sich eine Standardabweichung von 33 mm als Durchschnittswert aller Stationen, was für die weitere Bearbeitung der Daten ausreichend ist. Abb. 7 zeigt zur Veranschaulichung die Ufervegetation in einem Ausschnitt einer Punktwolke in Schrägansicht und die gesamte georeferenzierte Punktwolke.



Abb. 7: Punktwolke in Schrägansicht zur Darstellung der Vegetation (Mitte), Darstellung der gesamten Punktwolken der beiden Tisza-Uferböschungen (rechts)

Da die manuelle Eliminierung der Oberflächenpunkte mit Real Works Survey mehrere Tage Arbeitsaufwand (geschätzt) in Anspruch genommen hätte, wurden die gesamte Punktwolke in das Softwaremodul TerraScan zur weiteren Bearbeitung eingelesen. Mit TerraScan wurden alle (Vegetations-) Punkte über dem Gelände automatisch herausgefiltert und eliminiert, so dass das Modell von 6,3 auf 1,1 Millionen Punkte reduziert werden konnte. Anschließend

wurden diese Daten weiter auf 67032 Punkte reduziert, in dem die sogenannten Model-Key-Points berechnet wurden. Das Ergebnis wurde visuell durch Darstellung als 25 cm Höhenlinien überprüft und es wurden offensichtlich fehlerhafte Punkte anschließend manuell eliminiert, so dass am Ende nur noch eine um Faktor 100 reduzierte Punktwolke von ca. 61000 Punkte gegenüber der anfänglichen Punktzahl übrig blieb. Die gescannten Punktwolken und die daraus generierten Höhenlinien sind in Abb. 8 dargestellt.

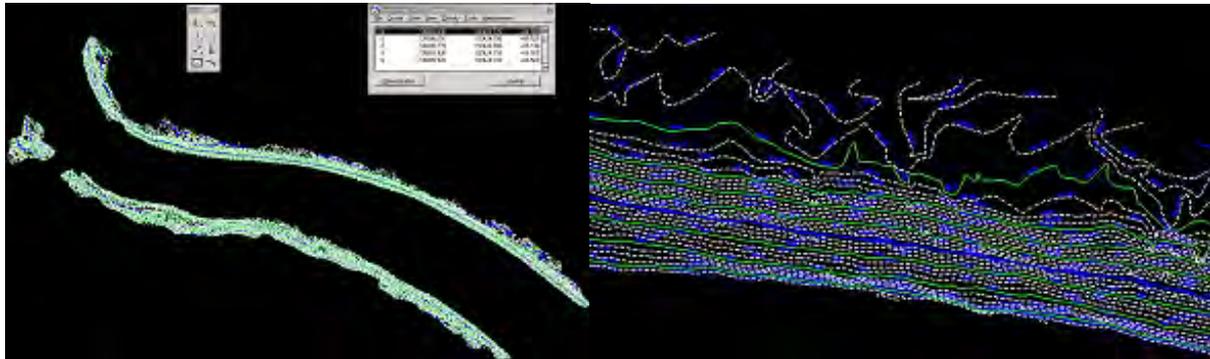


Abb. 8: Darstellung der gesamten Höhenlinien der Tisza-Uferböschungen (links) und ein Ausschnitt als Höhenlinien mit einer Äquidistanz von 25 cm (rechts)

Zur späteren Qualitätskontrolle des DGMs wurde alle 50 m ein Profil hangaufwärts tachymetrisch gemessen, das mit dem gefilterten DGM verglichen wurde. Für jeden Profilpunkt wurde die entsprechende Höhe aus dem DGM mit dem Programm DIGMO (Modul aus dem Programm TASH der Universität Hannover) berechnet. DIGMO berechnet aus 64 dem Profilpunkt nächstgelegenen Scanpunkten mit Hilfe eines Polynomansatzes eine Fläche und bestimmt dann die Höhe der Fläche am Profilpunkt. Die so berechneten Höhen von insgesamt 169 Punkten aus 37 Profilen ergaben eine Standardabweichung von ± 17 cm für den Einzelpunkt. Die maximalen Abweichungen liegen bei -0.48 m und $+0.49$ m. Dabei wurden vorher 24 grobe Fehler eliminiert, die aufgrund unzureichender Filterung und Aufnahmelücken (Abdeckung durch Vegetation) noch vorhanden waren.

Die gesamte Projektbearbeitung konnte mit einem Arbeitsaufwand von 10 Tagen (98 h) durchgeführt werden (Tab. 3). Dabei stellt die Datenerfassung im Feld mit drei Tagen (2 Personen je 12 h) den größten Aufwand dar. Die anschließende automatisierte Datenverarbeitung ermöglicht eine effiziente Generierung des digitalen Geländemodells.

Projekt	Scanning [h]	Geo-Referenz. [h]	Auswertung [h]	Kontrolle [h]	Σ [h]
Uferböschung Tisza	72	5	5	16	98

Tab. 3: Zeitlicher Aufwand für die Projektbearbeitung „Uferböschung Tisza“

6 Fazit und Ausblick

Die beiden vorgestellten Laserscanning-Projekte Ringwallanlage Willenscharen und Uferböschungen Tisza haben gezeigt, dass der Mensi GS100/GS200 aufgrund seiner Reichweite und seiner Funktionalität (z. B. Panorama-View) für topographische Geländeaufnahmen geeignet ist. Nach einer automatisierten Registrierung und Geo-Referenzierung der Punktwolken mit Real Works Survey kann eine effiziente Weiterverarbeitung durch die automatische Filterung und Eliminierung der Vegetation in TerraScan erfolgen. Der Datenfluss von der Scannersoftware zu TerraScan ist problemlos. Eine anschließende Reduktion der Daten auf sogenannte Model-Key-Points erleichtert die abschließende visuelle Kontrolle der Höhenlinien in Mic-

rostation, wobei die Höhenlinien bereits automatisch geglättet sind. Durch die automatische Datenverarbeitung wird die Bearbeitungszeit so stark reduziert, dass sie im Vergleich zur Datenerfassung vernachlässigbar gering ist. Erfahrungen mit anderen Laserscanning-Projekten in der As-Built-Dokumentation von Rohrleitungen und in der Gebäudeerfassung zeigen einen erheblich höheren Anteil (bis zu 1: 10) für die Datenauswertung (JAHN et al., 2004). Der automatische Auswerteprozess macht das terrestrische Laserscanning für die topographische Geländeaufnahme von kleinen Gebieten durchaus konkurrenzfähig zur tachymetrischen Aufnahme und zu airborne Laserscanning mit einem Helikopter. Aufnahmelücken durch Abdeckungen aufgrund der Vegetation können durch zusätzliche Scannerstandpunkte minimiert werden. Die Geländecharakteristik wird durch die hohe erfasste Punktdichte der Scannerdaten repräsentiert. Durch das Laserscanning werden Genauigkeiten erreicht, die der tachymetrischen Aufnahme entsprechen. Dennoch müssen weitere Untersuchungen hinsichtlich Effizienz und Qualität von topographischen Geländeaufnahmen mit Laserscannern erfolgen.

Durch eine hohe Automatisierung der Auswerteprozesse wird das Laserscanning-System in Zukunft eine zunehmende Akzeptanz im Markt erreichen. Die Systeme werden in Zukunft schneller, genauer, handlicher und hoffentlich auch günstiger werden. Zur Verbesserung des Laserscanning-Systems werden auch die Untersuchungen an Hochschulen beitragen.

7 Dank

Die Autoren bedanken sich bei Frau Dipl.-Ing. Jennifer Carl (Nebel + Partner, Schleswig) für die Bearbeitung der Laserscannerdaten mit der Software TerraScan. Herrn Dipl.-Ing. Werner Lottmann (RMK Vermessung, Celle) gilt der Dank für die gute Zusammenarbeit bei dem Projekt in Ungarn.

8 Literaturverzeichnis

- BOEHLER, W., BORDAS VICENT, M., MARBS, A., (2003): Investigating Laser Scanner Accuracy. Tagungsband des XIX. CIPA Symposiums, Antalya, Türkei, 30. Sept. – 4. Okt.
- HÖNNIGER, C. (2004): Topographische Aufnahme der sächsischen Ringwallanlage Willenscharen mit dem 3D-Laserscanning-System Mensi GS100. Unveröffentl. Diplomarbeit im Fachbereich Geomatik der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg.
- JAHN, I., KERSTEN, TH., KINZEL, R. (2004): Erfahrungen mit einem 3D-Laserscanning-System bei der Erfassung einer Industrieanlage und des Lübecker Holstentores. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 222-229.
- KERSTEN, TH., STERNBERG, H., MECHELKE, K., ACEVEDO PARDO, C. (2004): Terrestrischer Laserscanner Mensi GS100/GS200 – Untersuchungen und Projekte an der HAW Hamburg. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 98-107.
- MENSI (2004): GS100 3D laser scanner/GS200 3D laser scanner. <http://www.mensi.com/website2002/gs100.asp>, <http://www.mensi.com/website2002/gs200.asp>, besucht am 09.02.2004.
- MUCKE, J. (2002): Zur Leistungsfähigkeit des Lasermesssystems Callidus. Photogrammetrie und Laserscanning – Anwendung für As-Built-Dokumentation und Facility Management, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 84-92.

Automatisierte Ableitung von forstlichen Inventurparametern aus terrestrischen Laserscannerdaten

TOBIAS ASCHOFF¹, MICHAEL THIES¹, DANIEL WINTERHALDER¹, URSULA KRETSCHMER¹,
HEINRICH SPIECKER¹

Zusammenfassung: Im Rahmen von forstlichen Betriebsinventuren werden auf Stichprobenbasis Informationen über Baumarten, Durchmesser von Einzelbäumen und deren Höhe etc. erhoben. Diese werden auf der Ebene von Forstbetrieben verdichtet und beispielsweise für die nachhaltige Planung der zukünftigen Holznutzung verwendet. Am Institut für Waldwachstum der Universität Freiburg wird in dem vom BMBF geförderten Forschungsprojekt NATSCAN der Einsatz terrestrischer Laserscanner zur Optimierung von forstlichen Inventuren untersucht. Für die automatische Auswertung dieser Daten wurde eine mehrstufige Methodik entwickelt, bei der die Koordinaten der Punktwolke systematisch klassifiziert und schrittweise reduziert werden. In definierbaren Abständen über dem lokalen Terrain werden Schichten in die 3D-Punktwolke gelegt, innerhalb derer mit Hilfe einer Hough-Transformation die Baumfußpunkte und die Schaftdurchmesser in verschiedenen Baumhöhen ermittelt werden. Zusätzlich wird ein erster Ansatz zur Schätzung von Baumhöhen aus terrestrischen Laserscannerdaten mit Hilfe von Schaftfunktionen vorgestellt. Eine Diskussion sowohl möglicher Fehlerquellen als auch verschiedener Ansätze zur Verbesserung des Verfahrens schließt den Beitrag ab.

1 Einleitung

Eine nachhaltige Forstwirtschaft, die auf Dauer gesellschaftlichen Ansprüchen im Sinne von Nutz-, Schutz- und Erholungsfunktionen gerecht werden soll, lässt sich nur auf Grundlage von detailgenauen Informationen über den aktuellen Waldzustand umsetzen. Diese Daten wiederum ermöglichen die Ableitung von mittelfristigen Planungen unterschiedlicher forstlicher Maßnahmen. Die Gewinnung von Informationen über den Waldzustand erfolgt durch terrestrische Betriebsinventuren auf Stichprobenbasis. In Baden-Württemberg sind die Stichproben als konzentrische Probekreise mit gestaffelte Radien in Abhängigkeit von Brusthöhendurchmesser und Höhe der Bäume konzipiert, wobei der maximale Radius 12m beträgt (FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT BADEN-WÜRTTEMBERG 1995). Diese Stichprobenpunkte werden in einem Raster von 100m x 200m über einen Forstbezirk systematisch angelegt. Die Auswertungen der einzelnen Stichproben werden auf Betriebsebene verdichtet, so dass statistisch zuverlässige Aussagen über Baumartenanteile, Vorräte der Waldbestände, Verteilung der Bäume auf verschiedene Durchmesserklassen etc. abgeleitet werden können (KEMMNER & RISSE 1994, SPELLMANN ET AL. 1999). In einem Teilbereich des NATSCAN-Projektes (THIES ET AL. 2002) wird die Eignung von terrestrischen Laserscannern für Waldinventuren auf Stichprobenbasis überprüft. Im Unterschied zu den bisherigen Anwendungsbereichen von terrestrischem Laserscanning, bei denen in der Regel singuläre Objekte von großer Bedeutung, wie z.B. Bauwerke, Industrieanlagen etc. mit hohem Aufwand vermessen werden, ist bei der Auswertung von Stichprobeninventuren der einzelne

¹ Institut für Waldwachstum, Universität Freiburg, Tennenbacherstr. 4, 79106 Freiburg, e-mail: {tobias.aschoff, michael.thies, daniel.winterhalder, ursula.kretschmer, instww }@iww.uni-freiburg.de

Stichprobenpunkt nur ein kleiner Baustein zur Gewinnung der gewünschten Information. Die Anzahl auszuwertender Scanneraufnahmen ist dagegen sehr groß. Daraus folgt, dass der Aufwand bei der Datenauswertung bei definierter Qualität der Informationen möglichst minimiert werden muss. Entsprechend wurde für die Analyse von terrestrischen Laserscannerdaten ein Ansatz verfolgt, der eine weitgehende Automatisierung ermöglicht und dennoch reproduzierbare Daten hoher Qualität liefert sowie zu einer Verringerung des zeitlichen Aufwandes beiträgt. Es werden einerseits forstlich interessierende Parameter aus den 3D-Punktwolken extrahiert und andererseits Grundlagen für die Visualisierung von Waldabschnitten abgeleitet. Hauptgegenstand der Bearbeitungskette der Rohdaten, die aus kartesischen 3D-Koordinaten im ASCII-Format zzgl. der Intensitätsinformation bestehen, ist eine schrittweise Reduktion der Daten entsprechend des in Abbildung 1 dargestellten Ablaufs. Die Punktwolken resultieren aus Aufnahmen mit dem Imager 5003 der Firma Zoller&Fröhlich im März 2004 in noch unbelaubtem Zustand der Bäume. Die Datengewinnung erfolgt im multiple-scan-Modus (THIES ET AL. 2003), d.h. um einen Stichprobenmittelpunkt herum werden in diesem Fall fünf Scanneraufnahmen durchgeführt, die zueinander registriert wurden. Der Ablauf der Datenauswertung (s. Abbildung 1), der im Folgenden kurz zusammengefasst werden soll, sieht zunächst ein Ausfiltern von mixed pixels (d.h. Koordinaten außerhalb des ersten Eindeutigkeitsbereiches) und isoliert liegenden Punkten vor. Daran schließen sich die Algorithmen zur Berechnung eines digitalen Geländemodells (DGM) an. Auf Grundlage des DGMs wird ein Layer-Export durchgeführt, bei dem aus Schichten konstanten Abstandes zur Geländeoberfläche, die in die 3D-Punktwolke gelegt werden, kreis- und ellipsenähnliche Objekte extrahiert werden. Auf diese Weise können Baumdurchmesser in verschiedenen Höhen bestimmt werden. Die in Layern unterschiedlicher Höhe über dem Gelände gefundenen Kreise und Ellipsen werden in einem anschließenden Bearbeitungsschritt zu Bäumen zusammengefasst.

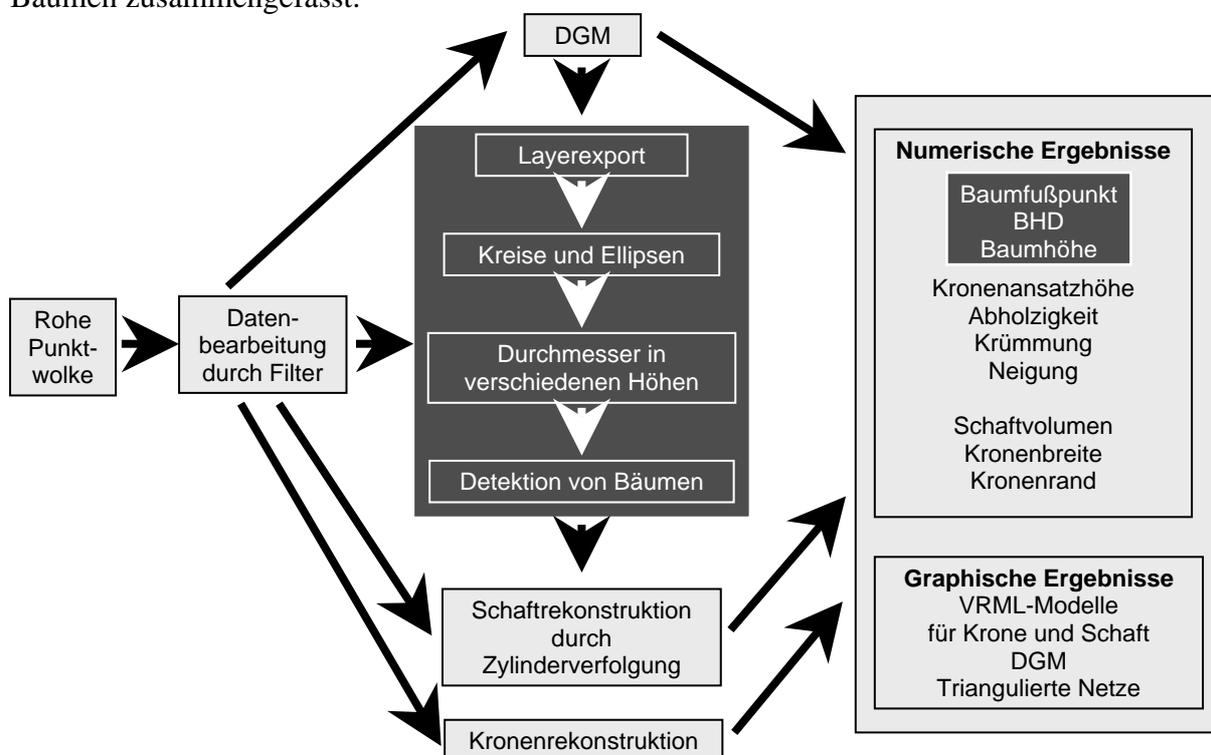


Abb. 1: Übersicht über die Methodik der Datenauswertung

Dadurch wird gleichzeitig der Startpunkt zur Approximation von Baumschäften durch ineinander geschachtelte Kreiszyylinder übergeben (THIES ET AL. 2004). Zur Rekonstruktion der Baumkrone, die bedingt durch überlappende Äste, Windbewegung etc. i.d.R. nicht unmittelbar vermessen werden kann, wurden zusätzlich Algorithmen zur Extrapolation der Baumhöhe und der Kronenarchitektur entwickelt.

Im Mittelpunkt des folgenden Beitrages steht die Beschreibung der Methodik und die beispielhafte Ermittlung der Parameter Baumfußpunkt, Brusthöhendurchmesser (BHD, d.h. ein wichtiger forstlicher Kennwert und entspricht dem Durchmesser eines Baumes in 1,30m über dem Gelände) und Baumhöhe (in Abb. 1 dunkelgrau unterlegt).

2 Material und Methoden

2.1 Detektion von Baumfußpunkten und Baumdurchmessern

Entsprechend der in SIMONSE ET AL. (2003) geschilderten Methode werden aus den gefilterten Scannerdaten die Durchmesser der Baumschäfte in verschiedenen Höhen abgeleitet. Dazu erfolgt zunächst die Generierung eines Geländemodells, indem die Punktwolke gerastert und innerhalb eines 50 x 50cm großen Rasterelements die niedrigste Z-Koordinate zwischengespeichert, eine Ausreißerüberprüfung vorgenommen und anschließend eine Delauny-Triangulation auf Basis des Sub-Datasets durchgeführt wird. In definierten Abständen über dem Gelände werden Schichten (Layer) aus den Punktwolken extrahiert, gerastert und jedes Rasterelement proportional zu der Anzahl von Koordinaten innerhalb des Elements durch Grauwerte kodiert und als 2D-Image dargestellt. Dieses kann mit konventionellen Bildbearbeitungsmethoden weiterverarbeitet werden. Die Querschnitte von Bäumen bilden sich als kreisähnliche Strukturen ab, die mit Hilfe einer HOUGH-Transformation detektiert werden und durch ausgleichende Kreise sowie ausgleichende Ellipsen angepasst werden (PITAS 2000). Die Mittelpunkte dieser geometrischen Körper in 1,30m Höhe (BHD) werden als Repräsentativwert für die Baumfußkoordinaten verwendet. Sich überlagernde Kreise aus mit zunehmender Höhe über dem Gelände ausgeschnittene Layern gehören mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem Baum und werden daher durch einen Ausgleichungsansatz, bei dem gleichzeitig Ausreißer eliminiert werden, miteinander verbunden.

2.2 Schätzung der Baumhöhe

Einer der wichtigsten Parameter von Einzelbäumen ist die Baumhöhe, die sowohl für die Volumenermittlung als auch in Verbindung mit dem Alter für die Einschätzung der standörtlichen Leistungsfähigkeit von Bedeutung ist. Eine direkte Messung der Baumhöhe aus den Scans ist jedoch nur in den seltensten Fällen möglich, da der obere Kronenbereich meist aufgrund von Verdeckungen durch Äste und Nadeln nicht direkt einsehbar ist oder Windbewegungen zu Verwischungseffekten im Scanbild führen, die nicht ausgewertet werden können. Durch die oben geschilderte Vorgehensweise liegen dagegen Informationen über die Schaftform als Wertepaare von Baumdurchmesser und zugehöriger Schafthöhe vor. Für die Extrapolation der Baumhöhe werden neben diesen Daten baumartenspezifische Schaftfunktionen verwendet, die die Abnahme des Durchmessers mit zunehmender Baumhöhe beschreiben. In dem vorliegenden Ansatz wird die modifizierte BRINK-Funktion verwendet, die aus zwei verknüpften Exponentialfunktionen besteht, von denen die eine den unteren und die andere den oberen Schaftabschnitt repräsentiert (BRINK & v. GADOW 1986, RIEMER ET AL. 1995). Neben drei baumartenspezifischen Parametern ist die Übergabe des BHD sowie der Baumhöhe erforderlich. Trotz erster Ansätze zur Unterscheidung von

Baumarten durch Überlagerung von Farb- und Geometrieinformationen aus Laserscannerdaten (HAALA ET AL. 2004), ist an dieser Stelle ein manuelles Eingreifen in den Prozess erforderlich, durch das die Baumart über einen Dialog übergeben wird. Der BHD wird nach der oben beschriebenen Methode bestimmt. Die Baumhöhe ist die gesuchte Größe und wird solange iteriert, bis die Fehlerquadratsumme der Anpassung der BRINK-Funktion an die Wertepaare minimal wird. Die spezifische Schaftform von Bäumen erübrigt die Unterscheidung zwischen einem lokalen und einem globalen Minimum der Fehlerquadratsumme.

2.3 Exemplarischer Waldbestand

Die geschilderten Methoden werden am Beispiel eines Waldbestandes am Westabfall des Schwarzwaldes im Bereich des Städtischen Forstamtes Freiburg exemplarisch umgesetzt. Bei dem Süd-West exponierten Steilhang handelt es sich um ein stark strukturiertes Buchenaltholz mit einzelnen Eichen sowie auf ca. 60% der Fläche Tannen und Buchen im Unter- und Zwischenstand. Das mittlere Alter der Bäume der herrschenden Kronenschicht beträgt ca. 135 Jahre und die mittlere Höhe dieser Bäume beläuft sich nach den Angaben im Forsteinrichtungswerk auf ca. 34m. Ein Eindruck der Struktur des Waldbestandes ergibt sich aus Abbildung 2, die eine 2D-Ansicht der unbearbeiteten Intensitätswerte eines 360°-Scans des beschriebenen Stichprobenpunktes darstellt.



Abb. 2: Scanner- Intensitätsbild des exemplarischen Waldbestandes

Mit Hilfe eines geschlossenen Polygonzuges, der sowohl an TPs als auch an ergänzenden hochgenauen GPS-Messungen auf Freiflächen im Wald, eingehängt wurde, erfolgte die Georeferenzierung der Stichprobenmittelpunkte und der einzelnen Scannerstandpunkte im Gauß-Krüger-Koordinatensystem. Für Vergleichszwecke wurden die Baumfußpunkte manuell mit einem Tachymeter eingemessen und der Brusthöhendurchmesser mit einer Kluppe als Mittelwert einer kreuzweisen Messung erhoben. Um abweichende Messstellen bei der Durchmesserermittlung auszuschließen, wurden die Messhöhe von 1.30m an allen Bäumen mit Hilfe eines Klebebandes markiert, das auch in den Scans sichtbar ist (s. Abbildung 2, weißer Kreis). Die Baumhöhen wurden mit einem Forestor Vertex © gemessen, der auf dem trigonometrischen Prinzip basiert. Auf diese Weise wurden 50 Bäume vermessen.

3 Ergebnisse

3.1 Baumfußpunkte

Von den 50 vermessenen Bäumen wurden 20 Bäume automatisch detektiert, wobei einschränkend festgestellt werden muss, dass die vier Scans nicht die gesamte Stichprobenfläche überlappend abgedeckt haben (s. Abbildung 3 in nordöstlicher und südöstlicher Richtung), daher ist eine objektive Bewertung des Verfahrens zur Detektion von Baumfußpunkten auf dieser Datengrundlage nicht möglich. Ein optischer Vergleich zwischen den automatisch ermittelten Baumfußpunkten und den tachymetrisch gemessenen ergibt sich aus dem Baumverteilungsplan in Abbildung 3. An den Achsen sind die Gauß-Krüger-Koordinaten aufgetragen. Die Lage der Baumfußpunkte ist durch einen Kreis gekennzeichnet. Die tachymetrische Messung ist grau dargestellt, die in den Scans detektierten Baumfußpunkte sind schwarz abgebildet. Die Zahlenwerte geben jeweils den zugehörigen BHD an. Grau sind die BHD aus der manuellen Klappung dargestellt und schwarz die aus automatischer Detektion.

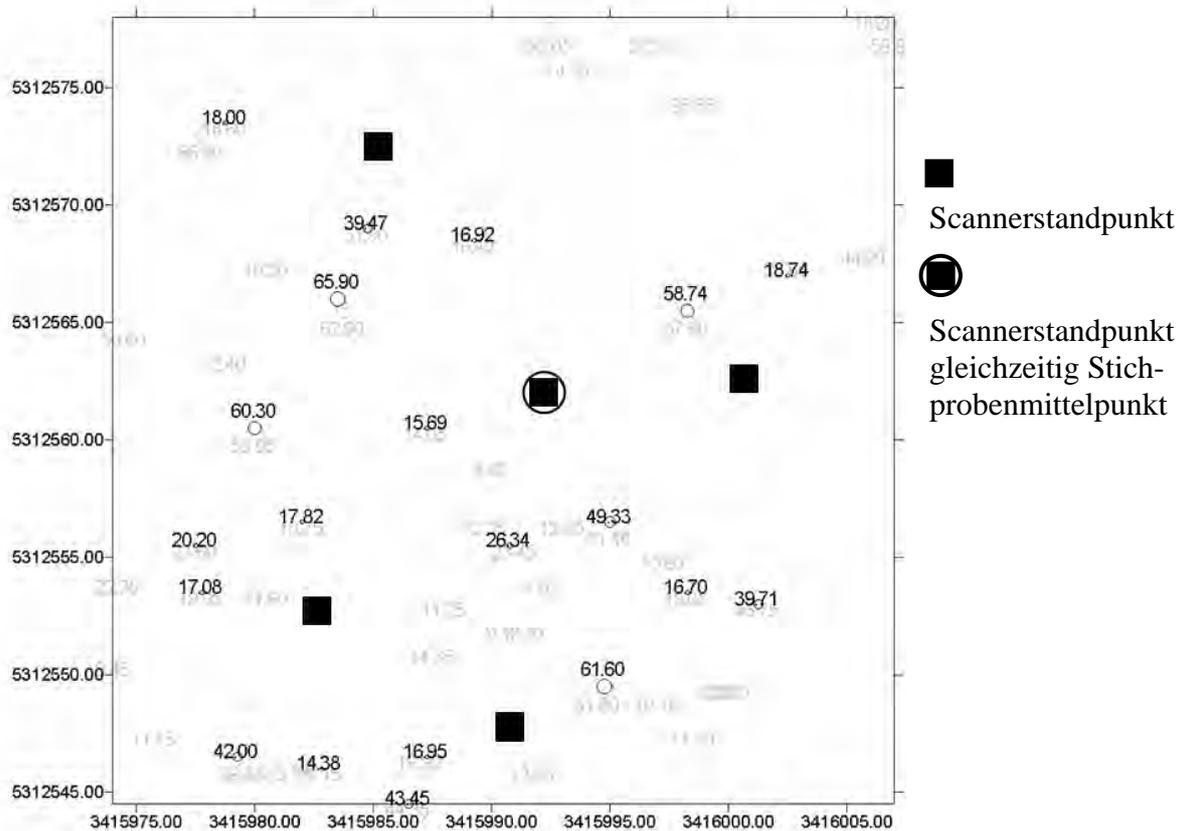


Abb. 3: Baumverteilungsplan des exemplarischen Waldbestandes und BHD der Bäume

Die Positionen stimmen vergleichsweise gut überein, wobei maximale Abweichungen von bis zu 30cm zu beobachten sind (s. Tabelle 1). Die mittlere Abweichung beträgt ca. 11cm. Es zeigt sich, dass die Zuverlässigkeit, mit der Bäume automatisiert gefunden werden können, mit abnehmendem Durchmesser geringer wird, stärkere Bäume werden dagegen zuverlässiger detektiert.

Tab. 1: Abweichungen der Baumfußpunkte der detektierten Bäume

Minimale Abweichung [cm]	Maximale Abweichung [cm]	Mittlere Abweichung [cm]	Standardabweichung [cm]
4,2	30,0	11,1	13,2

3.2 Brusthöhendurchmesser

Bei dem Vergleich zwischen manuell gemessenen und automatisch ermittelten Brusthöhendurchmessern lagen in sechs Fällen bei automatischer Ermittlung keine Durchmesserwerte unterhalb von 2,50m vor, sodass für diese kein BHD zu ermitteln war. Ursache hierfür waren Verdeckungen durch die grünen Kronen der Tannen im Unterstand (s. 2.3). In vier Fällen lag zwar kein Wert in 1,30m Höhe vor, jedoch Werte oberhalb und unterhalb, sodass der Wert in 1,30m Höhe durch lineare Interpolation bestimmt werden konnte. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 aufgeführt, wobei zwischen der automatischen Anpassung eines ausgleichenden Kreises und einer ausgleichenden Ellipse unterschieden wurde.

Tab. 2: Abweichung des BHD zwischen manueller Messung und automatischer Anpassung

	Minimale Abweichung [cm]	Maximale Abweichung [cm]	Mittlere Abweichung [cm]	Standardabweichung [cm]
Kreis	0,05	7,09	1,98	2,83
Ellipse	0,07	11,01	2,69	4,03

Sowohl im Hinblick auf den Mittelwert als auch unter Berücksichtigung der Extremwerte ergibt die Durchmesserermittlung mit Hilfe eines ausgleichenden Kreises geringere Abweichungen von den manuellen Messwerten als bei Anpassung von Ellipsen. Allerdings ergibt ein t-Test bei Annahme heterogener Varianzen keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Ermittlungsverfahren.

3.3 Baumhöhen

In drei Fällen war keine Baumhöhenschätzung mit der BRINK-Funktion möglich, da sich die Fehlerquadratsumme nicht minimieren ließ. Da zusätzlich bei sechs Bäumen kein BHD ermittelt werden konnte (s.o.), basieren die in Tabelle 3 dargestellten Ergebnisse auf elf Baumhöhenschätzungen. Die Ergebnisse der Höhenschätzung sind insgesamt unbefriedigend, da die maximale Abweichung bis zu 17m betragen und sich im Mittel auf 6m belaufen. Dabei konnten gleichermaßen Unter- als auch Überschätzungen beobachtet werden.

Tab. 3: Abweichung der Baumhöhe zwischen manueller Messung und automatischer Extrapolation

Minimale Abweichung [m]	Maximale Abweichung [m]	Mittlere Abweichung [m]	Standardabweichung [m]
1,13	17,36	6,40	8,03

Mögliche Fehlerquellen und Ansätze zur Verbesserung werden im folgenden Abschnitt diskutiert.

4 Diskussion und weiterer Forschungsbedarf

Eine mögliche Fehlerquelle bei der Detektion von Baumfußpunkten besteht darin, dass die Güte des zugrunde liegende Geländemodells wesentlich von der Beschaffenheit des Waldbodens abhängig ist. Dichte Bodenvegetation, Äste, liegendes Totholz, Felsen etc. führen bei der automatischen Generierung des Geländes zu Abweichungen, die sich im Folgenden sowohl bei der Bestimmung der Baumfußpunkte als auch bei der Ermittlung der Durchmesser niederschlägt. Eine weitere Fehlerursache kann in dem hier verwendeten Referenzdatensatz der tachymetrischen Aufnahme liegen, da nach exzentrischer Entfernungsmessung zur Winkelmessung nicht eingedreht wurde, sondern der Baumfußpunkt mit Hilfe halben Baumdurchmessers berechnet wurde. Um eine Quantifizierung der Fehlerauswirkungen durchführen zu können, sollte außerdem auf umfangreichere Messungen unterschiedlicher Bestandesstrukturen zurückgegriffen werden, für die jeweils nach exzentrischer Entfernungsmessung unmittelbar vor Ort der Winkel durch anpeilen der Baummittelpunkte ermittelt wird. Von den 50 manuell erfassten Bäumen wurden 20 erkannt. Auf die eingeschränkte Bedeutung dieser Aussage wurde bereits hingewiesen (s. 3.1). Neben Verdeckungen durch Unterholz, Sträucher etc. ist zusätzlich ein etwaiger Schrägstand der Bäume kritisch zu bewerten. Bei der bildanalytischen Suche der Kreise und Ellipsen ist eine Schrägstellung der Bäume zwar nicht von Bedeutung, aber Schwierigkeiten entstehen, wenn die Bäume so geneigt sind, dass die Kreise in den verschiedenen Schichten nicht mehr übereinander liegen, d.h. keine Schnittmenge mehr besitzen. In diesem Fall werden die Kreise nicht mehr zu einem Baum zugeordnet, sondern bilden unabhängige Abschnitte die wegen der geringen Zahl von Kreisen (weniger als fünf) nicht als Baum erkannt werden. Eine entsprechende Erweiterung des Algorithmus zur Verknüpfung der Kreise/ Ellipsen verschiedener Layer um einen Suchkegel definierbaren Radius könnte hier Abhilfe schaffen. Die Genauigkeit der Ermittlung der Brusthöhendurchmesser ist neben der Dicke der Bäume wesentlich von der Zahl der Scans abhängig, auf denen der jeweilige Baum abgebildet ist. Allerdings steigt mit zunehmender Anzahl der Scans auch der Zeitbedarf für die Datengewinnung. Ansätze eines Ausgleichs der Schaftquerschnitte mit Spline-Funktionen könnten zwar die Genauigkeit erhöhen, sind aber wiederum nur bei vier und mehr Scans aus unterschiedlichen Richtungen sinnvoll, da bereits bei der Anpassung der Ellipsen die größere Zahl der Freiheitsgrade im Vergleich zum Kreis zu einzelnen erheblichen Ausreißern führte und entsprechend die maximale Abweichung größer war als bei der Kreisanpassung. Während der durch die Abweichung eines Baumquerschnittes von der Kreisform bei nur einer Messung mit Hilfe einer Kluppe nach PRODAN (1965) bis zu 10% des Durchmessers betragen kann, sich aber bei kreuzweisem Kluppen auf einen Betrag von $\pm 0,5-1\%$ reduziert, kann bei dem Vergleich der BHD-Messungen von einer akzeptablen Referenz ausgegangen werden. Die größten Unsicherheiten des automatisierten Verfahrens sind mit der Extrapolation von Baumhöhen aus Durchmesser-/Schafthöhenwertepaaren verbunden. Bei der Mehrzahl der Bäume mit unbefriedigender Höhenschätzung lagen keine Durchmesserwerte im Bereich oberhalb von etwa 5m vor, so dass insbesondere der zweite, obere Ast der Exponentialfunktion sich eher willkürlich ergab. Daraus folgt als Voraussetzung für die Anwendung dieses Verfahrens das Vorhandensein von Durchmesserwerten in höheren Schaftpartien. Ohne diese ist eine sinnvolle Baumhöhenschätzung nach diesem Verfahren nicht möglich. Dies stellt gleichzeitig eine wesentliche Schwierigkeit dar, da der obere Bereich des Schaftes oftmals nicht sichtbar ist. Zusätzlich muss allerdings festgestellt werden, dass das Vorliegen von vielen Stützstellen auch in größeren Baumhöhen keine hinreichende Bedingung für exakte Höhenschätzungen ist, da auch in diesen Fällen Abweichungen von 10% bis 15% auftreten. Ein Weg zur Verbesserung der Höhenschätzung

könnte die Parametrisierung neuer, spezifisch angepasster Schaftfunktionen sein. Es ist denkbar, zu diesem Zweck auch die Höhen des Kronenansatzes und z.B. die Ausprägung der Wurzelanläufe hinzuzuziehen, insbesondere da diese mit dem geschilderten Verfahren vergleichsweise gut bestimmt werden können.

Neben der Integration der diskutierten Verbesserungsansätze ist in Zukunft eine Überarbeitung des Konzepts zur Datenhaltung erforderlich, da der vollständig automatisierte Ablauf der Gewinnung von forstlichen Inventurparametern aus terrestrischen Laserscannerdaten gegenwärtig noch lange Rechenzeiten erfordert.

5 Danksagung

Das Natscan-Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert (FKZ:13N8102). Neben dem Ministerium und dem Projektträger, dem Verein Deutscher Ingenieure (VDI), danken die Autoren vor allem der Fa. Zoller&Fröhlich, die bei der Datengewinnung beteiligt war und sich darüber hinaus stets mit Rat und Tat engagiert hat.

6 Literatur

- BRINK, C.; GADOW, K. v. (1986): On the use of growth and decay functions for modelling stem profiles. *EDV in Medizin und Biologie* 17: (1/2): 20- 27.
- FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT BADEN-WÜRTTEMBERG (1995): Betriebsinventur auf Stichprobenbasis (BI) Baden-Württemberg: Verfahrensbeschreibung und Aufnahmeanweisung. 20 S.
- HAALA, N.; REULKE, R.; THIES, M.; ASCHOFF, T. (2004): Combination of Terrestrial Laser Scanning with high Resolution Panoramic Images for Investigations in Forest Applications and Tree Species Recognition. Proceedings of the ISPRS working group V/1, Panoramic Photogrammetry Workshop; International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Vol XXXIV, Part 5/W16.
- KEMMNER, G.; RISSE, F.-J. (1994): Betriebsinventur auf Stichprobenbasis. *AFZ* 49; (10): 521- 523.
- PITAS, I. (2000): Digital image processing algorithms and applications. John Wiley & Sons Inc., New York. 419 pp.
- PRODAN, M. (1965): Holzmesslehre. J. D. Sauerländer's Verlag. Frankfurt a. M. 644 S.
- Riemer, T.; Gadow, K.V.; Sloboda, B. (1995): Ein Modell zur Beschreibung von Baumschäften. *AFJZ* 166; (7): 144- 147.
- SIMONSE, M., ASCHOFF, T., SPIECKER, H., THIES, M., 2003: Automatic Determination of Forest Inventory Parameters Using Terrestrial Laser Scanning.– Proceedings of the ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests 2003: 252-258.
- SPELLMANN, H.; NAGEL, J.; BÖCKMANN, TH. (1999): Summarische Nutzungsplanung auf Basis von Betriebsinventurdaten. *AFJZ* 170; (7): 122- 127.
- THIES, M.; PFEIFER, N.; WINTERHALDER, D.; GORTE, B.G.H. (2004): 3D-Reconstruction of Stems for Taper, Sweep, and Lean Assessment of Standing Trees. Submitted to *Scandinavian Journal for Forest Research* (in review).
- THIES, M.; ASCHOFF, T.; SPIECKER, H. (2003): Terrestrische Laserscanner im Forst - für forstliche Inventur und wissenschaftliche Datenerfassung. *AFZ/Der Wald* 58; (22): 1126-1129.
- THIES, M.; KOCH, B.; SPIECKER, H. (2002): Einsatzmöglichkeiten von Laserscannern für Wald- und Landschaftsinventuren. *AFZ/ Der Wald* 57; (8): 395- 397.

Vermessung der Pegasus-Statue auf der Wiener Staatsoper mittels Photogrammetrie sowie terrestrischen und Nahbereichs-Laserscannings

CAMILLO RESSL¹

***Zusammenfassung:** Es wird die Erstellung eines 3D-Modells einer Pegasus-Statue aus Laserscanner-Daten zum Zwecke statischer Untersuchungen beschrieben. Die Standbeine der Statue wurden mit dem Nahbereichs-Laserscanner Minolta VIVID 900 erfasst, wobei für jedes Standbein etwa 45 Einzelscans benötigt wurden. Der Rest der Statue wurde mit dem terrestrischen Laserscanner Riegl LMS-Z420i in 8 Aufstellungen erfasst. Die Vermessung dieser Statue mit den genannten Instrumenten ist deswegen besonders hervorzuheben, da hier einerseits für einen terrestrischen Laserscanner ein besonders „kleines“ Objekt aus noch dazu sehr kurzer Entfernung, und andererseits für einen Nahbereichsscanner ein sehr „großes“ Objekt aufgenommen wurde. Die gegenseitige Ausrichtung zwischen den Riegl-Daten und den zusammengesetzten Minolta-Daten wurde in einer hybriden Bündelblockausgleichung bestimmt, in der auch verknüpfende Photos der Statue verwendet wurden. Abschließend wurde aus den Daten ein „wasserdichtes“, für statische Untersuchungen geeignetes 3D-Modell dieser komplexen Statue abgeleitet.*

1 Einleitung

Am Dach der Wiener Staatsoper wurden im 19. Jahrhundert zwei Pegasus-Statuen errichtet. Aufgrund dieses hohen Alters und der ungünstigen Stabilisierung (jedes Pferd steht nur auf drei Beinen, die noch dazu fast in einer Linie angeordnet sind; siehe Abb. 1) wurden Bedenken bezüglich der Standsicherheit der Statuen laut. In der Folge wurde das Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik der TU Wien mit der Erstellung eines statischen Gutachtens für eine der beiden Statuen (Ausmaße: 4x3x4 m) beauftragt.

Voraussetzung für die statische Untersuchung ist ein 3D-Modell der gesamten Statue. Aufgrund der statischen Problemstellung ist die Modellierungsgenauigkeit der Standbeine besonders wichtig. Der restliche Körper der Statue kann hingegen gröber modelliert werden. Mit der Erstellung eines solchen 3D-Modells wurde das Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.) der TU Wien beauftragt.

An der TU Wien wurden im Rahmen sogenannter innovativer Projekte zwei Laserscanner angekauft: der terrestrische Laserscanner Riegl LMS-Z420i (Messbereich: 2-800m mit cm-Messgenauigkeit) [RIEGL LMS 2004] im Rahmen des innovativen Projektes "The Introduction of ILScan technology into University Research and Education" und der Nahbereichs-Laserscanner Minolta VIVID 900 (Messbereich: 0,6-2,5m mit mm-Messgenauigkeit), [MINOLTA 2004], im Rahmen des innovativen Projektes "3D Technology". Diese Geräte wurden für die Vermessung der Pegasus-Statue eingesetzt, wobei die Standbeine mit dem Minolta-Scanner erfasst wurden und der Rest der Statue mit dem Riegl-Scanner. Um beide Laserscanner in ein gemeinsames Koordinatensystem zusammenführen zu können, wurden zusätzlich Photos mit der Kodak DCS 460c um die Statue verteilt aufgenommen. In diesem Aufsatz

¹ DI Dr. Camillo Ressler, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, Gußhausstr. 27-29, 1040 Wien, e-mail: car@ipf.tuwien.ac.at

werden die einzelnen Arbeitsschritte von den Vermessungsarbeiten über die Registrierung der Daten bis zur Erstellung des 3D-Modells beschrieben.



Abb. 1: Links: Die zu modellierende Pegasus-Statue auf der Wiener Staatsoper. Rechts: Der Laserscanner Riegl LMS-Z420i im Einsatz (Foto: Riegl LMS).

2 Vermessungsarbeiten

Tabelle 1 enthält eine Kurzcharakterisierung der für die Vermessung der Statue zur Verfügung stehenden Laserscanner.

	Minolta VIVID 900	Riegl LMS-Z420i
Klassifizierung	Nahbereichs-Laserscanner	terrestrischer Laserscanner
Entfernungsmessung	Lichtschnittverfahren	Impulslaufzeit
Messbereich	mit Weitwinkelobjektiv: Blickfeld (Hz × V): 33° × 25° Entfernung: 0,6-2m (abhängig von Fokussierung)	Hz: 0-360° V: 40-120° Entfernung: 2-800m
Messgenauigkeit	< ±1mm (auf 1m)	< ±1cm (auf 3m)
Punkte pro Scan	680 x 480	bis zu 280.000.000 (abhängig von Winkelbereich und Winkelschrittweite)
Texturinformation	RGB: immanent	Laserintensität: immanent RGB: optional
Messdauer	2,5 sec	ca. 24.000 Punkte/sec

Tab. 1: Kurzcharakterisierung der zur Verfügung stehenden Laserscanner

2.1 Der Nahbereichs-Laserscanner Minolta VIVID 900

Der Minolta-Scanner ist in erster Linie für den Innenraumeinsatz zur Erfassung von Gegenständen in dm-Größe konzipiert. Aufgrund des verwendeten Lichtschnittverfahrens zur Entfernungsmessung setzt der Einsatz des Minolta-Scanners gewisse Anforderungen an das Umgebungslicht (d.h. Gleichmäßigkeit und nicht zu hell). Der Scannvorgang sieht üblicherweise so aus, dass der Gegenstand auf einem Drehteller positioniert wird und mehrmals in verschiedenen Drehstellungen vom fix stehenden Minolta-Scanner mit Überlappung aufgenommen wird. *Relativ zum Gegenstand* liefert somit jeder Einzelscan eine Punktwolke in einem anderen Koordinatensystem. Die so in unterschiedlichen Koordinatensystemen anfallenden Einzelscans müssen danach in einem gemeinsamen Koordinatensystem zusammengeführt werden. Für diesen Vorgang hat sich der Ausdruck „Registrierung“ eingebürgert (als Übersetzung des entsprechenden Englischen Ausdrucks ‚registration‘, was soviel bedeutet wie ‚genaues Ausrichten‘). Da im Allgemeinen in den Einzelscans keine korrespondierenden Punkte identifizierbar sind, die ein Zusammenführen mittels räumlicher Drehung und Schiebung erlauben würden, wird für diese Registrierung meist eine Form des sogenannten ICP-Algorithmus (engl. ‚iterative closest point‘ [BESL & MCKAY, 1992]) verwendet.

Beim ICP-Algorithmus wird die Registrierung von zwei Punktwolken – eine ausreichende Überlappung vorausgesetzt – in der Weise erreicht, dass eine Punktwolke festgehalten wird und die andere so von einer zur nächsten Iteration verdreht und verschoben wird, dass der Abstand zum nächstgelegenen Punkt der festgehaltenen Punktwolke minimiert wird. Da die iterativ zugeordneten Punkte nie wirklich korrespondieren können, wird die endgültige Registrierung im Allgemeinen nicht optimal sein.

Eine Weiterentwicklung des ICP-Algorithmus ist die sogenannte SDM-Methode (engl. squared-distance-minimization; z.B. [POTTMANN ET AL., 2002]). Hier wird zu einem Punkt der ersten Wolke, nicht wie beim ICP-Algorithmus der Abstand zum nächstgelegenen Punkt der zweiten Wolke minimiert, sondern der Abstand zur nächstgelegenen Tangentialebene der zweiten Wolke. Dadurch ergibt sich erstens eine qualitativ bessere Registrierung, und zweitens konvergiert diese Methode schneller als der ICP-Algorithmus (quadratisch statt linear).

Die vom Minolta-Scanner aufgenommenen Daten können direkt im Softwarepaket Raindrop Geomagic Studio 5 [RAINDROP GEOMAGIC, 2004] verarbeitet werden. Diese Software erlaubt die Registrierung von zwei und mehreren Einzelscans nach der SDM-Methode.

2.2 Der terrestrische Laserscanner Riegl LMS-Z420i

Der LMS-Z420i eignet sich für den Innen- und Außeneinsatz gleichermaßen, setzt wegen der aktiven Laserquelle kaum Anforderungen an die Beleuchtungsverhältnisse, und wird im Vergleich zum Minolta-Scanner zum Scannen von Objekten mit Durchmesser von wenigen Metern bis mehreren hundert Metern verwendet. Unabhängig von der Größe des Objekts wird auch bei der Aufnahme durch den Riegl-Scanner im Allgemeinen mehr als ein Scan notwendig sein um das Objekt vollständig erfassen zu können. Obwohl die einzelnen Riegl-Scans im Prinzip auch per ICP oder SDM registriert werden können, werden jedoch in der Praxis meist vor dem Laserscanning retroreflektierende Signalmarken am Objekt oder in der Nachbarschaft aufgeklebt und während des Scannvorgangs erfasst. Dadurch ist erstens eine Registrierung der Einzelscans mit Hilfe korrespondierender Punkte möglich, und zweitens können – im Prinzip – die einzelnen Scans mit deutlich geringerer Überlappung aufgenommen werden als für eine ICP- oder SDM-Registrierung notwendig wäre.

Die Steuerung des Riegl-Scanners und die Bearbeitung der aufgenommenen Daten erfolgt mit der Software RiSCAN-Pro [RIEGL LMS, 2004].

2.3 Die Vermessung der Pegasus-Statue

Da die Standbeine detaillierter zu modellieren waren als der Rest der Pegasus-Statue, wurde für die Standbeine der genauere Minolta-Scanner eingesetzt. Aufgrund des kleinen Blickfelds des Minolta-Scanners musste jedes Standbein (Höhe ca. 1,5m) aus vielen Einzelscans zusammengesetzt werden. Ein Einzelscan deckte eine Fläche von etwa $30 \times 30 \text{ cm}^2$ mit einem typischem Punktabstand von 1mm am Objekt ab; Abb. 2 (mitte). Um diese Scans in Geomagic Studio mittels SDM-Methode registrieren zu können, wurde auf eine Überlappung der Einzelscans von 30-40% geachtet. Manche Teile der Beine waren schwer zugänglich, so waren die Beininnenseiten nur unter der Statue erreichbar. Andere Teile wiederum waren schwer einsehbar, wie die Hufpartien oder die abgewinkelte Ferse. Aufgrund dieser Umstände bedurfte es etwa 200 Minolta-Einzelscans um die drei Standbeine vollständig zu erfassen (Aufnahmedauer: etwa 10 Stunden verteilt auf drei Tage).

Deutlich einfacher war die Aufnahme der gesamten Statue mit dem Riegl-Scanner. Innerhalb von 6 Stunden konnte die gesamte Statue mit 8 Scans erfasst werden (inklusive Bauch, exklusive einiger höher gelegener nicht einsichtiger Bereiche; Gesamtpunkteanzahl: ca. 2,4 Mill.). Mit Hilfe von 23 Signalmarken konnten die Scans bereits vor Ort registriert werden.

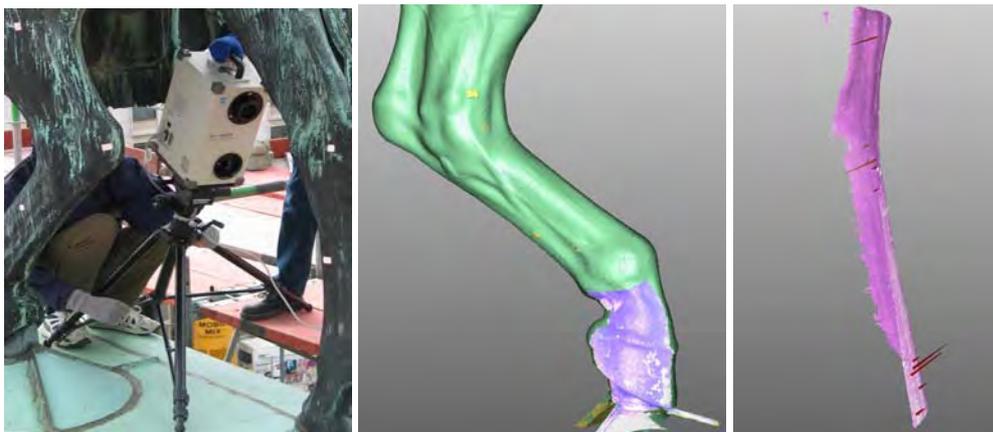


Abb. 2: Links: Der Laserscanner Minolta VIVID 900 im Einsatz (Foto: N. Studnicka).

Mitte: Ein ausgewählter Minolta-Einzelscan von insgesamt 42, die für die Modellierung des geknickten Standbeins verwendet wurden. Dieser Einzelscan ist mit seiner aufgezeichneten RGB-Information wiedergegeben und der in grün dargestellten Gesamtregistrierung aller 42 Einzelscans überlagert.

Rechts: Grobe Scanfehler (rot betont, max. 4.5cm) eines Minolta-Einzelscans (mit der aufgezeichneten RGB-Textur dargestellt, Größe: ca. $30 \times 15 \times 8 \text{ cm}^3$).

Von den Statikern wurden an der Statue radiographische und Ultraschall-Messungen zur Materialanalyse vorgenommen, und die Orte dieser Messungen wurden mit weißen Klebestreifen markiert; siehe Abb. 2 (links). Letztere sollten koordinativ bestimmt werden. Zu diesem Zweck wurden von der Statue 8 Aufnahmen mit der digitalen Kamera Kodak DCS 460c mit einem 15mm-Objektiv gemacht. Da in diesen Bildern auch die meisten Riegl-Signalmarken abgebildet sind, stellen die Bilder den Rahmenblock für das spätere Zusammenführen der Riegl- und Minolta-Daten dar, wobei die Verknüpfung der verschiedenen Datensätze durch die weißen Klebestreifen und die Riegl-Signalmarken erfolgt: Im Intensitätsbild jedes Riegl-

Scans sind neben den Riegl-Signalmarken auch viele weiße Klebestreifen zu erkennen. Letztere können auch im RGB-Bild mancher Minolta-Scans identifiziert werden.

Um die Modellierung der Pegasus-Statue korrekt in Bezug zum natürlichen Lot durchführen zu können, wurden die Riegl-Signalmarken zusätzlich noch mit einem Nivellier eingemessen. Alle Vermessungsarbeiten fanden Anfang bis Mitte November 2003 statt. Der Einsatz des Riegl-Scanners und des Minolta-Scanners bei der Pegasus-Statue ist in Abb. 1 (rechts) bzw. Abb. 2 (links) dargestellt.

3 Orientierung aller Daten

Zunächst erfolgte die Registrierung der Minolta-Einzelscans für jedes Standbein getrennt. Danach wurden alle Daten – 8 Bilder, 8 Riegl-Scans, 3 Minolta-Standbeine und die Nivellierdaten – in einer gemeinsamen hybriden Bündelblockausgleichung zusammengeführt.

3.1 Registrierung der Minolta-Daten

Von den ursprünglich insgesamt 200 aufgenommenen Minolta-Einzelscans wurden letztendlich etwa 45 Einzelscans pro Standbein verwendet (siehe Abb. 2 (mitte) und Abb. 3 a)). Vor der Registrierung der Einzelscans, die mit dem Programm Raindrop Geomagic Studio 5 durchgeführt wurde, wurden zunächst alle Einzelscans von groben Scan-Fehlern manuell befreit (siehe Abb. 2 (rechts)) und das Rauschen in den Daten leicht reduziert. Bei der Registrierung selbst startet man zunächst mit zwei Scans. Einen davon hält man fest und registriert den anderen zum festgehaltenen. Die dafür verwendete SDM-Methode benötigt eine grobe Startregistrierung, die durch manuelles Identifizieren von drei korrespondierenden Bereichen in den beiden Scans erfolgt.

Danach hält man die beiden bereits registrierten Scans fest und fügt einen dritten hinzu, usw. bis alle Einzelscans eines Standbeins zusammengefügt sind. Im Anschluss daran kann die gegenseitige Ausrichtung aller Scans noch verbessert werden indem eine sogenannte globale Registrierung durchgeführt wird. Dabei werden alle Scans gleichzeitig gegeneinander leicht verdreht und verschoben. Nach der globalen Registrierung der Einzelscans wurde jedes Standbein durch rund 4,5 Mill. Punkte beschrieben. Um die Weiterverarbeitung einfacher zu gestalten, wurden die Punkte speziell im Überlappungsbereich, wo sich oft bis zu 4 Einzelscans überdeckten, ausgedünnt. Mit der Geomagic-Funktion „Select Best Data“ wurden die Daten pro Standbein auf rund 2 Mill. Punkte reduziert; d.h. die ursprünglich erstellten Einzelscans überlappen sich im Durchschnitt zu 50%.

Am Ende einer globalen Registrierung gibt Geomagic Studio die Standardabweichung der Distanzen zwischen den Scans aus. Für jedes Standbein ergab sich etwa ein Wert von 0,2mm. Leider ist ein solch kleiner Wert für die Standardabweichung der Distanzen kein Garant für eine saubere Registrierung. So waren trotz dieser kleinen Standardabweichung bei allen Beinen noch einige grobe Registrierungsfehler vorhanden, siehe Abb. 3, ohne dass man von Geomagic Studio in dieser Hinsicht informiert wird. Besonderes problematisch ist dabei, dass man beim Betrachten des Ergebnisses nur grobe Registrierungsfehler außerhalb des Beins erkennen kann. Fehler im Inneren bleiben verdeckt. Eine mögliche Strategie auch Fehler im Inneren zu finden besteht darin, die registrierten Daten auszudünnen (z.B. nur ein Punkt pro 4mm-Voxel) und nach Punkthäufungen zu suchen; siehe Abb. 3.

Eine Ursache für diese groben Registrierungsfehler konnte nicht gefunden werden. Mögliche Ursachen könnten sein:

- Die Aufnahmebedingungen waren nicht optimal:
 - Der Zugang zur Statue war nur über ein Baugerüst möglich, bei dem Schwingungen nicht vermeidbar waren. Oft musste der Minolta-Scanner vom Stativ genommen werden, um die Sicht zu bestimmten Statuenteilen zu erhalten. Mehrmals musste der Scanner dazu auch in ungewöhnlicher Weise (stark gekippt oder fast ‚am Rücken liegend‘) ausgerichtet werden. Dabei konnte der Scanner nur per Hand oder mit Pflöcken stabilisiert werden. Aufgrund der zwar kurzen aber doch endlichen Aufnahmedauer von ca. 2,5 Sekunden sind daher Fehler dynamischer Natur in den Aufzeichnungen nicht auszuschließen.
 - Nach dem Scannen der Beine am ersten Tag stellte sich heraus, dass nicht alle Bereiche erfasst wurden. Somit mussten an einem weiteren Tag Ergänzungsaufnahmen durchgeführt werden. An beiden Messtagen (im November) herrschten einerseits generell sehr kalte Temperaturen (die von den üblichen Labortemperaturen deutlich abwichen), und andererseits waren die Temperaturverhältnisse für beide Tage und für die Einzelscans, die im Laufe eines Tages bei unterschiedlichem Sonnen- und Wolkenstand aufgenommen wurden, unterschiedlich. Diese Temperaturänderungen könnten die Basislänge zwischen Laser- und Kamerateil des Scanners beeinflussen. Daher ist es denkbar, dass Gruppen von Einzelscans mit leicht unterschiedlichen Maßstäben aufgenommen wurden; d.h. man hätte an jedem Messtag mehrmals die Kalibrierung des Geräts überprüfen müssen, was allerdings ein entsprechendes (mobil einsetzbares) Kalibrierungsobjekt voraussetzt.
- Die große Anzahl von 45 Einzelscans pro Standbein, deren hohe Überlappung und die riesige Anzahl von etwa 4.5 Mill. Punkten könnten womöglich den Registrierungsalgorithmus von Geomagic überfordert haben. Speziell könnte das Aufstellen der Korrespondenzen zwischen den Punkten und der Tangentialebenen davon betroffen sein.

Nach der ersten globalen Registrierung jedes Beines wurde das Ergebnis auf grobe Registrierungsfehler untersucht und die entsprechenden Einzelscans zur Gänze entfernt. Anschließend wurde die globale Registrierung wiederholt.

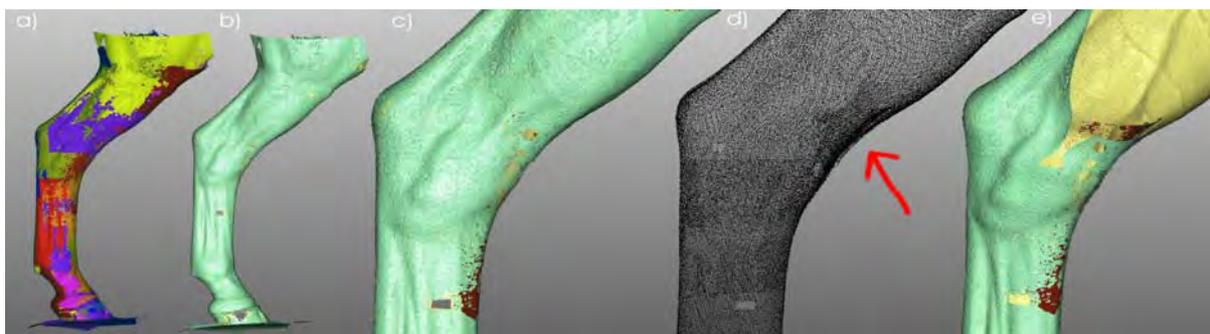


Abb. 3: Das ausgestreckte hintere Standbein

- Ergebnis der ersten globalen Registrierung; jeder Einzelscan ist in einer anderen Farbe dargestellt.
- wie a); alle Einzelscans sind gleich eingefärbt (grün = Außenseite, gelb = Innenseite)
- Detail von b); in rot ist ein grob falsch registrierter Einzelscan dargestellt, der von außen aber nicht als solcher erkannt wird.
- wie c); ausgedünnter Datensatz mit einem Punkt pro 4mm-Voxel. Die Bereiche mit dichter liegenden Punkten markieren Bereiche mit Registrierungsfehlern.
- wie c); verdrehte Darstellung mit ebenem Anschnitt. Die Schnittlinie des roten Einzelscans sollte mit der Schnittlinie der restlichen grünen Einzelscans zusammenfallen.

3.2 Hybride Bündelblockausgleichung aller Daten

Nachdem in den Bildern, den Riegl-Scans und den in Geomagic Studio zusammengesetzten Minolta-Standbeinen die weißen Klebestreifen und Riegl-Signalmarken manuell gemessen wurden, erfolgte eine hybride Ausgleichung dieser Beobachtungsdaten gemeinsam mit den Nivellementmessungen im Programm ORIENT [ORIENT 2004]. Tabelle 2 enthält die Ausgleichungs-Statistik. Das Datum wurde dabei wie folgt festgelegt: der Ursprung wurde in eine der Riegl-Signalmarken am Fundament der Statue gelegt, zwei Rotationen wurden durch die Nivellementmessungen bestimmt und der Maßstab war über beide Scannerdaten und das Nivellement gegeben. Die fehlende horizontale Verdrehung wurde so bestimmt, dass sich eine korrekte azimutale Ausrichtung des Blocks ergab. Letzteres war notwendig, da die Statiker Aufzeichnungen der Zentralen Wetterwarte über Windrichtung und -stärke verarbeiten wollten, um deren Einfluss auf die Statik der Statue – speziell die Flügel des Pegasus – abschätzen zu können.

Beobachtungstyp	1- σ -Genauigkeit
Photos (DCS 460c)	0,5pixel
Riegl-Scans:	
Horizontal-Winkel	0,07 ^{gon}
Vertikal-Winkel	0,05 ^{gon}
Strecke	0,02m
Minolta-Scans:	
x,y,z	0,003m
Nivellement	0,005m

Tab. 2: Genauigkeiten (als 1-fache Standardabweichung) der einzelnen Beobachtungstypen in der hybriden Ausgleichung

Das Ergebnis der Bündelblockausgleichung sind im Wesentlichen die verbesserten Positionen und Verdrehungen der 8 Riegl-Scans und der zusammengesetzten Minolta-Standbeine relativ zum definierten Datum. Abb. 4 visualisiert dieses Ergebnis in Form der Überlagerung der Punktwolken der 8 Riegl-Scans und der Minolta-Standbeine.

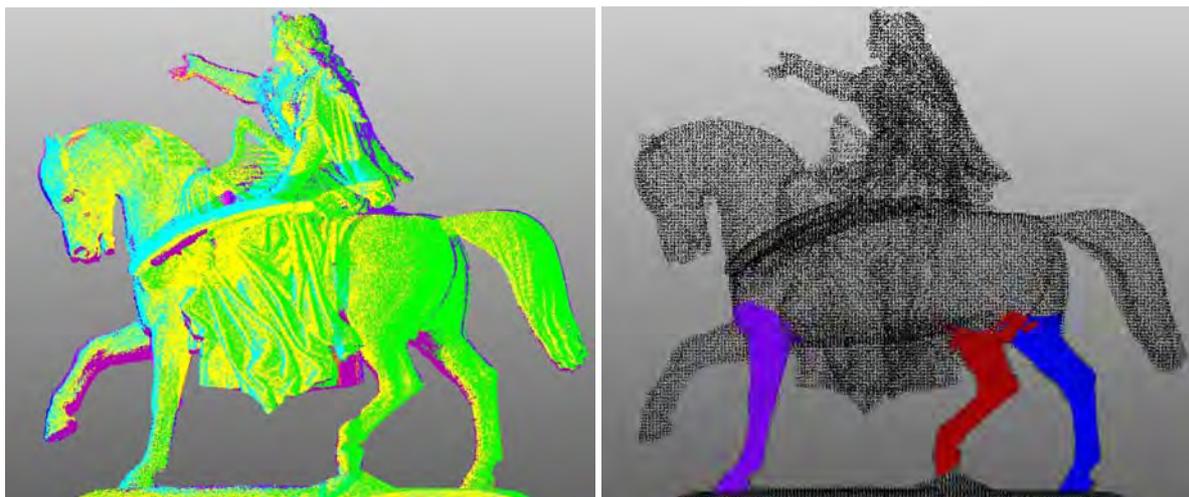


Abb. 4: Visualisierung der aus der Bündelblockausgleichung resultierenden Orientierung der Riegl-Scans und Minolta-Standbeine. Links: die 8 Riegl-Scans in unterschiedlichen Farben dargestellt. Rechts: Die Stellung der Minolta-Standbeine relativ zu den Riegl-Daten; letztere sind zur Verbesserung der Darstellung ausgedünnt.

Bevor die Minolta-Standbeine in die Bündelblockausgleichung mitaufgenommen wurden, wurde versucht, die Minolta-Daten mit der SDM-Methode in Geomagic mit den bereits registrierten Riegl-Daten zu verknüpfen. Jedoch war das Ergebnis nicht sehr zufriedenstellend, was sich darin ausdrückte, dass die Minolta-Standbeine leicht asymmetrisch in den Riegl-Daten zu liegen kamen. Die Ursache dafür wird im unterschiedlichen Rauschen in den Riegl- und Minolta-Daten vermutet, und dass sich dadurch Probleme bei der SDM-Methode ergeben können: die stärker verrauschten Riegl-Daten, die bei der Registrierung fest gehalten werden, definieren die Tangentialebenen für die SDM-Methode, auf die dann die weniger verrauschten Minolta-Daten eingepasst werden.

Aus diesem Grund wurden die Minolta-Standbeine mit den weißen Klebestreifen als Verknüpfungspunkte in den Bündelblock mitaufgenommen. Die damit erhaltene Lagerung zwischen den Riegl- und Minolta-Daten war etwas besser als jene der SDM-Registrierung in Geomagic. Wegen der erwähnten Probleme bei der Registrierung der Minolta-Daten und der daraus resultierten Ungewissheit bezüglich der Korrektheit der zusammengesetzten Standbeine, wurden die Standbeine in je zwei überlappende Ober- und Unterteile geteilt. Im Bündelblock konnten sich diese geteilten Minolta-Datensätze über die Verknüpfer bestmöglich an die anderen Datensätze (Riegl-Daten und Photos) anpassen. Konsequenterweise wurde damit die Lagerung zwischen den Riegl- und Minolta-Daten noch etwas verbessert.

4 3D-Modellierung der Statue

Ziel der Vermessung war ein 3D-Modell der Statue. Wegen der anschließenden statischen Modellierungen durfte das geometrische Modell selbst keine Löcher aufweisen; es musste ein Volumen beschreiben, also ‚wasserdicht‘ sein. Da die Statiker für ihre eigene Modellierung das geometrische Volumen durch finite Elemente ersetzen, musste das geometrische Modell möglichst kompakt repräsentiert werden.

Aus diesen Gründen (Löcher und riesige Datenmenge) konnten die registrierten ausgedünnten Punktwolken nicht einfach trianguliert werden. Anstatt dessen wurde mittels Geomagic ein NURBS-Modell abgeleitet. NURBS steht für ‚Non-Uniform Rational B-Splines‘. Ein NURBS-Modell ist eine analytische Beschreibung der Statue, die aus der originalen Punktwolke abgeleitet wird. Somit vereint ein NURBS-Modell den Detailreichtum einer dichten Punktwolke mit der Effizienz einer analytischen Beschreibung.

Die Erzeugung des NURBS-Modells wurde mit Geomagic Studio in mehreren Schritten durchgeführt (wobei die Minolta- und Riegl-Daten erst zum Schluss zusammengeführt wurden):

1. Transformation der einzelnen Datensätze ins gemeinsame Datum:
Mit dem Geomagic-Hilfsmittel ‚transform‘ können die im Bündelblock bestimmten Verschiebungen und Verdrehungen an die einzelnen Datensätze (8 Riegl-Scans und die zusammengesetzten Minolta-Standbeine) angewendet werden.
2. Ausdünnung der originalen Punktwolke (Geomagic-Befehl ‚uniform sample‘):
Die Minolta-Standbeine wurden mit einem Punktabstand von 3mm (Huf) bis 15mm (oberes Beinende) ausgedünnt. Somit wurde jedes Minolta-Standbein letztendlich durch ca. 150.000 Punkte beschrieben. Die Riegl-Daten wurden mit 15 – 20mm Punktabstand ausgedünnt und enthielten am Ende ca. 450.000 Punkte.
3. Triangulierung jedes Datensatzes (Geomagic-Befehl ‚wrap‘) mit Triangulierungskorrektur (Geomagic-Befehl ‚clean‘) und einmaliger minimaler Rauschverminderung (Geomagic-Befehl ‚noise reduction‘):

Es hat sich als vorteilhaft erwiesen ‚wrap‘ gemeinsam mit ‚clean‘ mehrmals hintereinander auszuführen, wobei vor jeder Wiederholung die Triangulierung aufgehoben werden muss (Geomagic-Befehl ‚modify current points‘), um die angepasste Punktwolke erhalten zu können. In dieser Weise wird die Anzahl der Punkte etwas, die Anzahl der Löcher jedoch deutlich reduziert. So wurde beim Riegl-Datensatz die Anzahl der Löcher von anfangs 100.000 nach viermal ‚wrap‘ und ‚clean‘ auf unter 200 gebracht. Die verbleibenden Löcher konzentrierten sich auf drei Stellen (Flügeloberseite, Übergang Reiterin und Pferderücken, Übergang Satteldeckeinnenseite und Pferdebauch), die manuell gefüllt werden konnten.

4. Zusammenfügen aller triangulierten Datensätze (Geomagic-Befehl ‚merge‘) und automatische NURBS-Erzeugung; siehe Abb. 5.

Da die Punktdichte zwischen den vier Datensätzen (3 Minolta-Standbeine und der Riegl-Rumpf) sehr unterschiedlich ist, müssen die Datensätze als Triangulationen zusammengefügt werden und nicht als Punktwolken. In letzterem Fall würde die anschließende Triangulierung wieder Löcher erzeugen. Es existiert in Geomagic ein gutes Werkzeug, das mittels weniger Steuerparameter (z.B. Oberflächengenauigkeit und Detailreichtum) aus einer triangulierten Fläche automatisch eine NURBS-Repräsentation erzeugt.

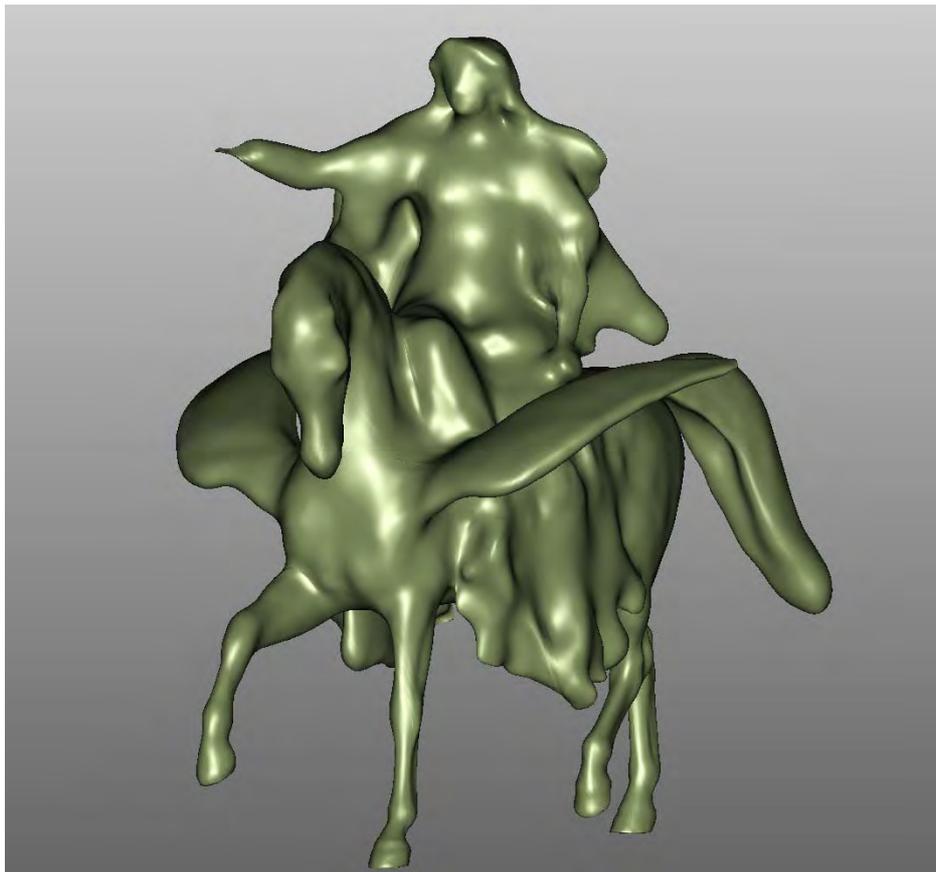


Abb. 5: Das 3D-Modell der gesamten Pegasus-Statue in der NURBS-Repräsentation. Von den original gescannten Punkten (drei Minolta-Standbeine zu je ca. 4,5 Mill. Punkte und acht Riegl-Einzelscans zu insgesamt 2,3 Mill. Punkte) wurden letztendlich nur 165.000 für die NURBS-Erzeugung verwendet. Beim Oberkörper sind viele Details aufgrund der geringeren Punktdichte bei der Modellierung verloren gegangen (z.B. Harfe oder rechte Hand). Für die nachfolgenden statischen Untersuchungen waren diese Details jedoch nicht von Belang.

5 Zusammenfassung

Es wurde beschrieben, wie unter Verwendung des Nahbereichs-Laserscanner Minolta VIVID 900 und des terrestrischen Laserscanners Riegl LMS-Z420i ein 3D-Modell einer Pegasus-Statue zum Zwecke statischer Untersuchungen erstellt wurde. Die Registrierung der Minolta-Einzelscans erfolgte mit dem Programm Raindrop Geomagic Studio 5. Es zeigte sich dabei, dass nach der globalen Registrierung immer noch einige grobe Registrierungsfehler vorhanden waren, obwohl die Standardabweichung zwischen den Scans mit 0,2mm ausgegeben wurde. Als Ursachen für diese groben Fehler werden die ungünstigen Aufnahmebedingungen bzw. eine Überforderung des Registrierungsalgorithmus von Geomagic aufgrund der hohen Anzahl von Einzelscans vermutet.

Die gegenseitige Ausrichtung zwischen den Riegl-Daten und den zusammengesetzten Minolta-Daten wurde in einer hybriden Bündelblockausgleichung bestimmt, in der auch verknüpfende Photos der Statue verwendet wurden. Die nach der Ausgleichung geschätzte Genauigkeit der zusammengesetzten Minolta-Daten ergab sich dann an einzelnen diskreten Punkten zu etwa $\pm 3\text{mm}$. Dieses Beispiel zeigt, dass die Registrierung von Punktwolken ohne Korrespondenzen, zumindest so wie sie in Raindrop Geomagic Studio 5 realisiert ist, eine diffizile Angelegenheit sein kann. Dies gilt besonders für Aufnahmen, die nicht unter Laborbedingungen erstellt wurden und für Objekte, bei denen sehr viele Einzelscans zur vollständigen Erfassung notwendig sind. In diesem Fall geht viel der Genauigkeit der Einzelscans in der Summe der Registrierungen verloren.

Die erreichte Genauigkeit war für das gegebene Problem nach Rücksprache bei den Statikern mehr als ausreichend. Die statischen Untersuchungen basierend auf dem erzeugten NURBS-Modell der Statue sind mittlerweile abgeschlossen und es werden die auftretenden Spannungszustände bei verschiedenen ‚worst-case‘-Belastungsszenarien als unbedenklich beurteilt.

In der Zwischenzeit wurde die Version Raindrop Geomagic Studio 6 veröffentlicht, die mit einigen Erweiterungen im Bereich der Registrierung ausgestattet sein soll. Es ist daher geplant, zumindest für Teile des Minolta-Datensatzes die Registrierung mit dieser neuen Version von Geomagic Studio zu wiederholen. Unter Umständen ergeben sich dadurch neue Erkenntnisse über die möglichen Ursachen der in Kapitel 3.2 beschriebenen Registrierungsfehler.

6 Literaturverzeichnis

- BESL, P.J., MCKAY, N.D., 1992: A method for registration of 3-D shapes. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 14 (2), 239-256.
- MINOLTA, 2004: <http://www.minoltausa.com/vivid/default.asp>
- ORIENT, 2004: ORIENT - An Universal Photogrammetric Adjustment System, Product Information, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, TU Vienna, http://www.ipf.tuwien.ac.at/products/produktinfo/orient/html_hjk/orient_e.html
- POTTMANN, H., LEOPOLDSEDER, S., HOFER, M., 2002: Simultaneous registration of multiple views of a 3D object. Processings PCV '02, Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV, Part 3A, Commission III.
- RAINDROP GEOMAGIC, 2004: <http://www.geomagic.com/products/studio/>
- RIEGL LMS, 2004: <http://www.riegl.co.at/>

Bestimmung von Einflussgrößen in der Nahbereichsphotogrammetrie mittels Monte-Carlo-Simulation

HEIDI HASTEDT, THOMAS LUHMANN & WERNER TECKLENBURG¹

Zusammenfassung: In diesem Beitrag wird ein Simulationsverfahren vorgestellt, mit dem anhand numerischer Simulation auf Basis realer Datensätze auf den photogrammetrischen Prozess wirkende Einflussfaktoren untersucht werden sollen. Im Folgenden soll hauptsächlich das Verfahren beschrieben und zum Anderen kurz Untersuchungen zu Einflüssen aus Objektraum, Systemfestlegung und die Auswirkungen unterschiedlicher Kameramodelle betrachtet werden. Die Untersuchungen beziehen sich auf die Verifizierung nach der VDI/VDE-Richtlinie 2634 mit den darin spezifizierten Genauigkeits- und Abnahmekriterien.

1 Einleitung

In den letzten Jahren ist die Entwicklung hochgenauer optischer 3D-Messsysteme stark gestiegen. Hierbei werden Ein- und Mehrkerasysteme basierend auf digitalen Bildsensoren mit Beleuchtungs- und Projektionseinrichtungen verschiedener Konstruktionen angeboten. Sie erreichen hohe Messgenauigkeiten, die vor allem im industriellen Bereich benötigt werden. Diese Genauigkeiten sind im Bezug auf die Abnahme nach VDI/VDE Richtlinie 2634 nachweisbar. Jedoch zeigen viele Untersuchungen, dass die theoretisch erreichbaren Genauigkeiten nicht ohne Restunsicherheiten, wie z.B. längenabhängige Trends in den Längemessabweichungen, erzielbar sind. Unterschiedliche Einflussfaktoren können durch geeignete Verfahren bestimmt und deren Auswirkung minimiert werden. In den Untersuchungsreihen sind allerdings immer verschiedene Einflussgrößen gleichzeitig enthalten, die das Gesamtsystem beeinflussen und als Restunsicherheiten im Ergebnis verbleiben.

Zur Untersuchung der einzelnen Einflüsse auf das photogrammetrische Gesamtsystem wurde ein Verfahren notwendig, in dem gezielt und separiert systematische Fehler eingebracht und deren Auswirkung unbeeinflusst von anderen, veränderten Parametern auf die Auswertung untersucht werden können. Da praktische Versuche immer eine Vielzahl Veränderliche enthalten bzw. aufwändige Laborversuche zudem unwirtschaftlich sind, wurde diesbezüglich ein numerisches Simulationsverfahren auf Basis der Monte-Carlo-Methode (MCM) entwickelt. Das Simulationsverfahren wird in den folgenden Ausführungen spezifiziert.

Zur Beurteilung der Simulation und der gesuchten Auswirkungen werden zunächst Längemessabweichungen (VDI/VDE 2634, 2001) bestimmt und näher untersucht. Hierbei ergeben sich Beurteilungskriterien aus dem Vergleich der generierten Bündel in Bezug auf den Ausgangsdatsatz der Simulation sowie auf übergeordnete Referenzkoordinaten aus einer Punktmessung mit einem Koordinatenmessgerät (KMG). Des weiteren wurden Maßstabsuntersuchungen durchgeführt. Alle Simulationen sind mit unterschiedlichen Kameramodellen berechnet, so dass ebenfalls Aussagen über das Verhalten der Bündelausgleichung bezüglich der Kamerageometrie getroffen werden können. Das Simulationsverfahren bietet die Möglichkeit der gezielten Untersuchung von Einzelkomponenten des photogrammetrischen Systems und zeigt in diesem ersten Verfahren seine Funktionalität.

¹ Fachhochschule Oldenburg/Ostfr./Whv., Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik, Ofener Str. 16, 26121 Oldenburg, Tel. 0441-7708-3243, iapg@fh-oldenburg.de

2 Monte-Carlo-Methode

Die Monte-Carlo-Methode (MCM) ist ein statistisches Simulationswerkzeug, auch genannt Verfahren der statistischen Versuche. Innerhalb des Simulationsprozesses wird eine Zahl unabhängiger Variationen generiert, woraus das Optimum der Zielfunktion bestimmt wird. Die Simulation kann als Optimierungsvorgang durch Variation näher bezeichnet werden. Die Wahrscheinlichkeit dieses Optimum zu erzielen wächst mit der Anzahl der Simulationen (SCHMITT, 1977). Statistische Simulationsverfahren sind Hilfsmittel zur Lösung komplexer linearer Gleichungssysteme. Die MCM kann für die Lösung komplexer Systeme genutzt werden, bei denen die Untersuchung einzelner Systemkomponenten im Vordergrund steht, aber dennoch gleichzeitig das Gesamtergebnis betrachtet werden soll (SCHWENKE, 1999). Das Prinzip der virtuellen Experimente wurde bereits durch SCHWENKE (1999) erfolgreich für den Anwendungsfall der KMG realisiert. Die aufgeführten Vorteile können auf die optische Messtechnik im wesentlichen übertragen werden:

- Einbindung von Filtern und Algorithmen
- funktionales Modell der Simulation bedarf keiner zusätzlichen Linearisierung
- Anwendung beliebiger Wahrscheinlichkeiten, Verteilungsfunktionen

Für den Simulationsprozess ergeben sich verschiedene Arbeitsschritte. COX et al. (2001, 2004) unterscheiden zwei Phasen der Unsicherheitsbestimmung nach der Monte-Carlo-Methode. Phase 1 konzentriert sich als Formulierungsphase auf die Wahl der Modell- und Wahrscheinlichkeitsfunktion sowie die Bereitstellung der Eingabeparameter. Die anschließende zweite Phase, die Berechnungsphase, bildet den Kern der Simulation nach MCM. Abb. 1 zeigt den Arbeitsprozess einer Simulation nach COX et al. (2001).

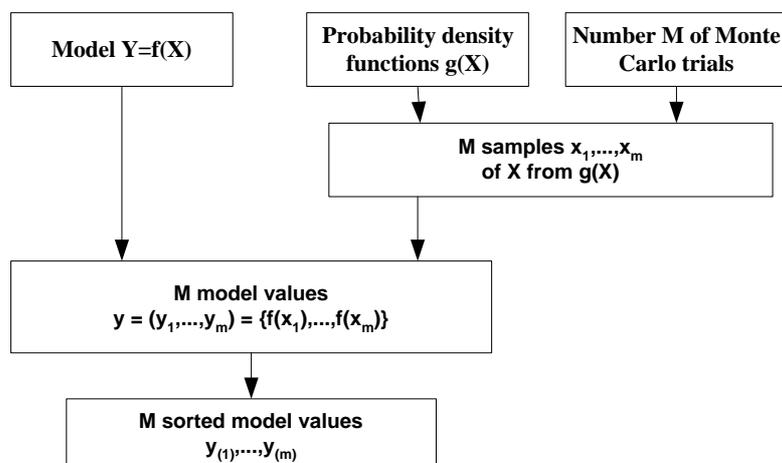


Abb. 1: Simulationsprozess nach COX et al. (2001)

Für den Simulationsprozess wird eine Vielzahl Zufallszahlen benötigt. Zufallszahlengeneratoren erzeugen üblicherweise gleichverteilte Pseudo-Zufallszahlen im Intervall $[0,1]$. Durch geeignete Algorithmen können diese in beliebige Verteilungen transformiert werden. Zur Erzeugung normalverteilter Zufallszahlen $N_{(0,1)}$ kann der Box-Muller-Algorithmus verwendet werden. Hierfür gilt: sind U_1 und U_2 unabhängig gleichverteilte Zufallszahlen $U_{(0,1)}$, ergeben sich X_1 und X_2 zu unabhängig normalverteilten Zufallszahlen $N_{(0,1)}$ mit (1) (ROBERT & CASELLA, 2002; COX et al. (2001,2004)).

$$X_1 = \sqrt{-2\log(U_1)} \cos(2\pi U_2) \quad X_2 = \sqrt{-2\log(U_1)} \sin(2\pi U_2) \quad (1)$$

Für den im Folgenden beschriebenen Simulationsprozess wurde zunächst eine Normalverteilung zu Grunde gelegt. Streng genommen muss hier für endliche Wiederholungen eine Student-(t)-Verteilung zur Erzeugung der im Simulationsprozess verwendeten Pseudo-Zufallszahlen genutzt werden. Ein geeigneter Pseudo-Zufallszahlengenerator für t-verteilte Zufallszahlen formuliert COX et al. (2001, 2004), ROBERT & CASELLA (2002). V_1 und V_2 werden als unabhängig gleichverteilte Zufallszahlen zur Berechnung geeignet verteilter Zufallswerte (2) verwendet:

$$V_1 < \frac{1}{2} \begin{cases} Z = \frac{1}{4V_1 - 1} \\ V = \frac{V_2}{Z^2} \end{cases} \quad V_1 \geq \frac{1}{2} \begin{cases} Z = 4V_1 - 3 \\ V = V_2 \end{cases} \quad (2)$$

Werden zudem mit f = Anzahl Freiheitsgrade folgende Bedingungen (3) erfüllt, kann Z als t-verteilte Pseudo-Zufallszahl für den Simulationsprozess verwendet werden.

$$V < 1 - \frac{|Z|}{2} \quad \text{oder} \quad V < \left(1 + \frac{Z^2}{f}\right)^{-(f+1)/2} \quad (3)$$

3 Simulationsverfahren

Das Simulationsverfahren ist so konzipiert, dass die Simulationsdaten auf vorliegenden photogrammetrischen Bündeln für Verifizierungen nach VDI/VDE 2634 basieren. Der Simulationsprozess basiert demnach auf den Kollinearitätsgleichungen. Im Falle der Auswertungen mit einem erweiterten Kameramodell ist das Modell der Kollinearitätsgleichungen um bildvariante Parameter erweitert, Abweichungen werden in den betreffenden Abschnitten erläutert. Eine genaue Definition kann HASTEDT et al. (2002) entnommen werden.

Aufgrund vieler Eingangsparameter für eine Bündelausgleichung erfolgt die Erzeugung der Simulationsdaten in Einzelschritten (siehe Abb. 2). Ausgehend von der vordefinierten Anzahl an Simulationsdurchläufen werden zunächst alle für den Prozess notwendigen Zufallszahlen generiert (Step 2, Abb. 2). In das Verfahren ist die Veränderung aller Kameraparameter für jedes Bild pro Bündel innerhalb ihrer Standardabweichung implementiert, d.h. es wird eine Veränderung der Kamera bei jedem Auslösen impliziert, jedoch ist dies zur Bestimmung einzelner Einflüsse auch selektierbar (Step 3, Abb. 2). Ein Parameter wird dann nach folgendem Modell (4) neu berechnet:

$$P_{(rm)} = P_{(iv)} + (nRNG_1 [tRNG] * s_p) \quad (4)$$

$P_{(rm)}$	veränderter Parameter durch Simulation
$P_{(iv)}$	Eingabewert des Parameters (<i>InputB</i> , Kap.4)
$nRNG_1; tRNG$	normalverteilte Zufallszahl, t-verteilte Zufallszahl
s_p	Standardabweichung des Parameters (aus Eingabedaten)

Die Grundlage für die Simulation bilden dann die neu berechneten Bildmessungen (St3.4). Diese werden aus dem als fehlerfrei angenommenen Objektraum und den äußeren Orientierungen anhand der veränderten Kameraparameter berechnet. Innerhalb ihrer Standardabweichung bekommen sie ggf. ebenfalls einen Zuschlag (St3.5). Abb. 2 zeigt das Ablaufdiagramm für die Erzeugung der Simulationsmodelle.

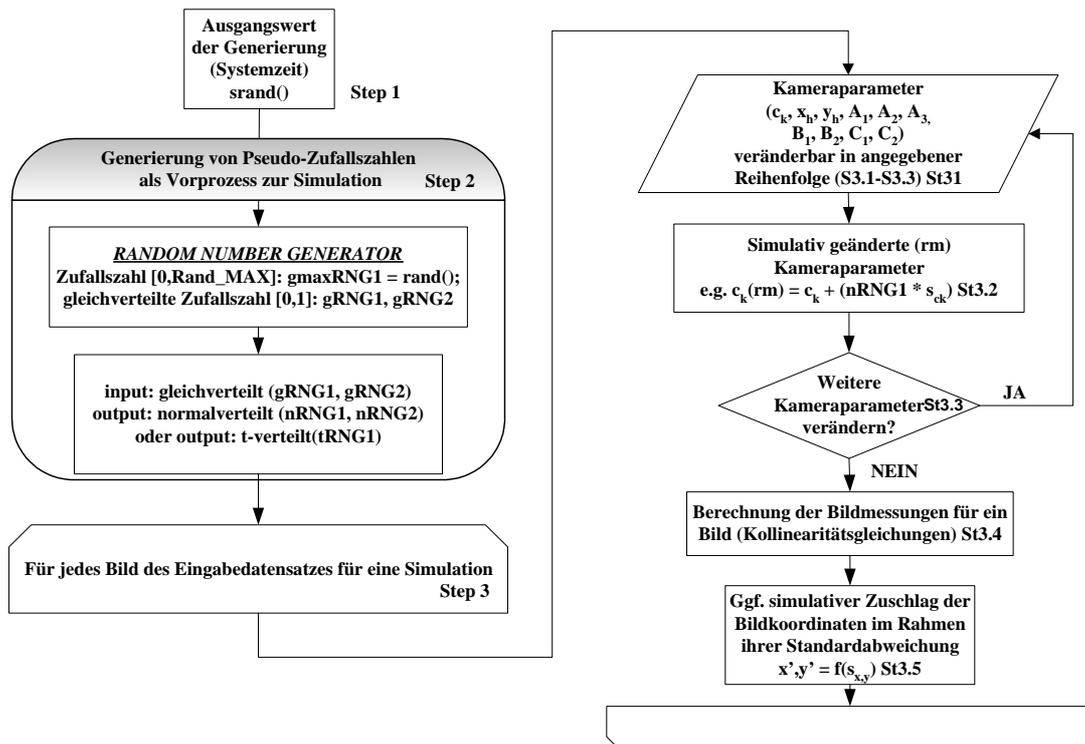


Abb. 2: Ablaufplan für den Simulationsprozess

4 Ergebnisse

Die Diskussion der Ergebnisse wird in diesem Kapitel zunächst durch allgemeine Erläuterungen und der Veranschaulichung der Implementierung vorbereitet. Die zur Beurteilung herangezogenen Simulationen basieren auf einem photogrammetrischen Datensatz. Der Basisdatensatz, parametrisiert in Tabelle 1 und im folgenden mit *InputB* bezeichnet, wurde mit einer Kodak DCS645M in einem Rundumverband erstellt. Als Objekt diente hierbei ein institutseigener Testkörper mit 92 Referenzlängen. Die Genauigkeit beträgt von $RMS_{(XYZ)}[Ref] = 0.015\text{mm}$ (5).

Kodak DCS 645 M – 35mm Objektiv				Bildverband mit 60 Bildern			
Sensorformat: 36.648 x 36.648 mm ² 4072 x 4072 Pixel				2410 Bildmessungen 200 Objektpunkte			
ck	-35.6637	sck	0.0005	B1	2.37E-06	sB1	2.23E-07
xh	-0.0993	sxh	0.0007	B2	-1.46E-07	sB2	2.21E-07
yh	0.4083	syh	0.0007	C1	1.06E-04	sC1	3.30E-06
A1	-9.01E-05	sA1	1.56E-07	C2	-1.04E-05	sC2	3.17E-06
A2	6.23E-08	sA2	6.88E-10				
A3	-1.48E-11	sA3	9.20E-13				

Tabelle 1: Basisdatensatz (*InputB*)

Die Simulationen wurden mit am IAPG bzw. der Firma AXIOS 3D entwickelten Bündelausgleichungsprogrammen durchgeführt. Das Programm Ax.Ori arbeitet mit einer selbständig fehlereliminierenden Bündelausgleichung mit herkömmlichem Kameramodell ($c_k, x_h, y_h, A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, C_1, C_2$). Zum Anderen wurde das Programm FiBun verwendet, welches auf dem in HASTEDT et al. (2002) erläuterten Kameramodell basiert.

4.1 Implementierung

Zufallszahlen

Für die Simulationen wurde zur Implementierung zunächst eine Normalverteilung zu Grunde gelegt. Im weiteren Verlauf der Entwicklung des Simulationsverfahren wurde ebenfalls die t-Verteilung als Funktion zur Generierung der Zufallszahlen hinzugefügt. Abb. 3 und 4 zeigen die Auswirkung der Verteilung der normal- und t-verteilten Zufallszahlen für 32000 Werte. Während sich die normalverteilten Zufallszahlen aufgrund ungenügend großer Anzahl darstellbarer und benötigter Werte so darstellen, dass zusätzlich weitere Häufigkeiten auftreten, stellen sich die t-verteilten Werte mit $f = n-u$ (Freiheitsgrade der jeweiligen Bündelausgleichung) erwartungsgemäß gleichmäßig verteilt dar.

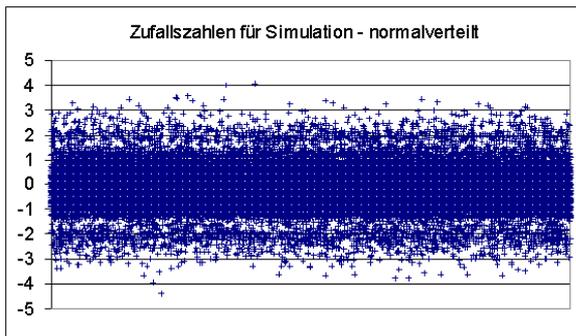


Abb. 3: normalverteilte Zufallszahlen

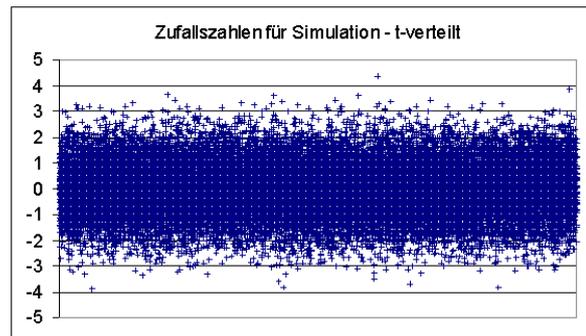


Abb. 4: t-verteilte Zufallszahlen

Simulationenwerte der Kamerageometrie

Hinsichtlich der Eingabeparameter (*InputB*) ergeben sich für 200 Simulationen bei je 60 Bildern die in Abb. 5 und 6 dargestellten normalverteilten Eingabeparameter für die Simulationen.

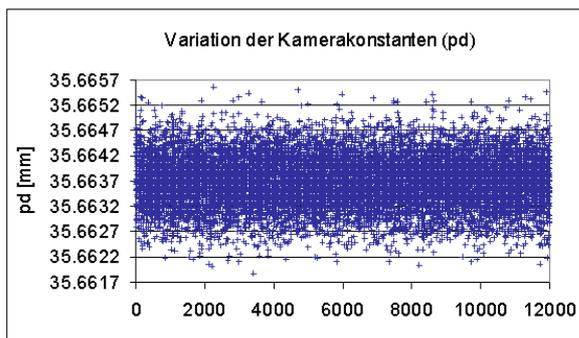


Abb. 5: simulierte Eingabewerte c_k

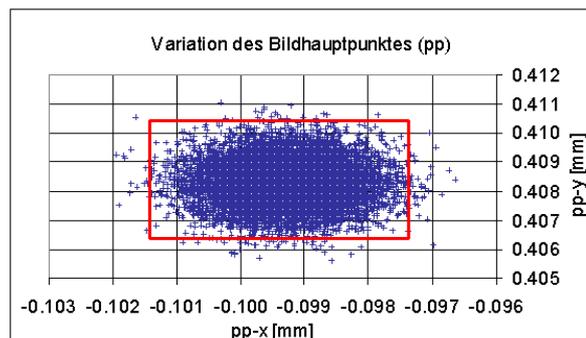


Abb. 6: simulierte Eingabewerte x_h, y_h

Die Kamerakonstante variiert dabei im Wertebereich 36.66187mm bis 36.66556mm. Bezüglich ihrer Standardabweichung $s_{ck} = 0.0005\text{mm}$ liegen 0.4% aller Werte außerhalb 3σ . Gleiches gilt für die x-Koordinate des Bildhauptpunktes bei einem Wertebereich von -0.10194mm bis -0.09664mm. Für die y-Koordinate des Bildhauptpunktes ergibt sich, dass 0.2% aller zwischen 0.40561mm und 0.41106mm liegenden Simulationenwerte außerhalb der dreifachen Standardabweichung liegen. Das in Abb. 6 (rot) markierte Feld begrenzt den 3σ -Wertebereich des Bildhauptpunktes.

Objektraum

Die Beurteilung der inneren und äußeren Systemgenauigkeit der Simulationsdaten basiert auf der Annahme, dass jedes simuliert erzeugte Bündel eine mögliche reale Konfiguration darstellt, da die veränderten Parameter ausschließlich innerhalb ihrer Standardabweichungen variieren. Für die in diesem Abschnitt spezifizierten Untersuchungen wurden Längenmessabweichungen (LME) nach VDI/VDE 2634 (2001) bezogen auf kalibrierte Werte aus einer KMG-Messung als Beurteilungskriterium für die äußere Genauigkeit herangezogen.

Hinsichtlich der verwendeten Kamera und der erzielten inneren Systemgenauigkeit kann eine Genauigkeit des Objektraumes von $RMS_{(XYZ)}[ObSp] = 0.040\text{mm}$ erwartet werden (5). Da die LME von beiden Ungenauigkeiten ($RMS_{(XYZ)}[ObSp]$, $RMS_{(XYZ)}[Ref]$) beeinflusst werden, können für die LME folgende Unsicherheiten erwartet werden: $\pm 60\mu\text{m}$ für 1σ , $\pm 120\mu\text{m}$ für 2σ , $\pm 180\mu\text{m}$ für 3σ .

$$RMS_{(XYZ)} = \sqrt{[RMS(X)]^2 + [RMS(Y)]^2 + [RMS(Z)]^2} \quad (5)$$

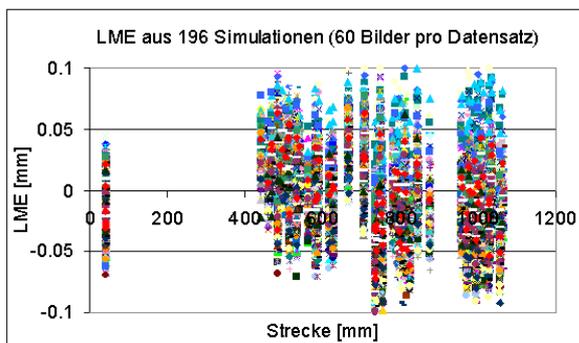


Abb. 7: LME für 200 Simulationen

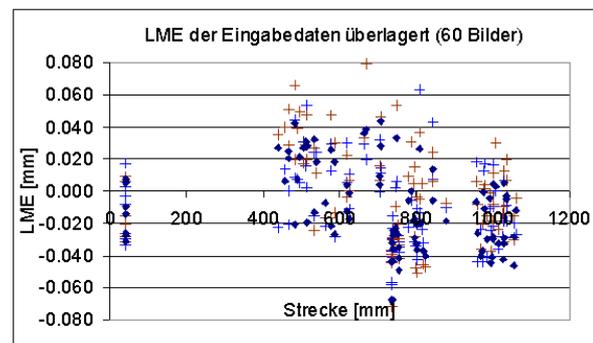


Abb. 8: LME im Vergleich zu *InputB*-Daten

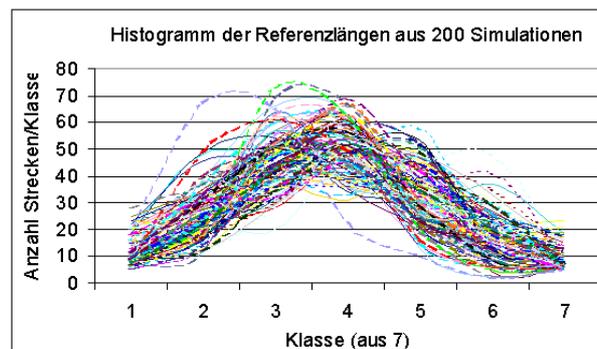


Abb. 9: klassifizierte LME

Abbildung 7 zeigt die LME für 200 Simulationen. Aufgrund der hohen Zahl an Werten ist eine Analyse im Gesamtdiagramm nicht möglich. Beispielhaft wurden deshalb zwei Simulationsergebnisse (Kreuze) zusammen mit den LME des Basisdatensatzes (Punkte) in einem Diagramm dargestellt (Abb. 8). Hier zeigen sich anschaulich die stark ändernden Ergebniskonstellationen anhand der LME für ein Bündel, wobei zu bedenken bleibt, dass die Eingangswerte ausschließlich innerhalb ihrer Standardabweichung variiert wurden. Diese Effekte werden im Folgenden näher betrachtet. Zusammenfassend wurden die LME klassifiziert und ergeben sich approximiert zu einer Gaußschen Glockenkurve (Abb. 9). Dies entspricht den Erwartungen bei implementierter Normalverteilung für die Simulation. Das

Simulationsverfahren läuft demzufolge ausreichend stabil für normalverteilte Zufallszahlen. Entsprechende Tests wurden ebenfalls erfolgreich mit verwendetem t-verteiltern Ansatz erzielt.

4.2 Analyse und Diskussion

Zur Beurteilung und Analyse der Restfehler in längenabhängigen Anteilen (Trend) aus früheren Untersuchungen zur Kamerakalibrierung (HASTEDT et al., 2001) muss zunächst festgestellt werden, ob die Referenzkoordinaten ggf. stark fehlerhaft sind. Hierzu wurden Simulationen mit zwei Systemfestlegungen durchgeführt. Zum Einen mit $r=6$ und 3 Maßstäben in den drei Koordinatenrichtungen (Abb. 11), zum Anderen wurde eine freie Netzausgleichung mit der Lagerung auf allen Objektpunkten (Abb. 10) verwendet. Die LME wurden hierbei bezogen auf den Ausgangsdatensatz der Simulation (s. Abb. 10.1) sowie auf Referenzkoordinaten (s. Abb. 10.2) bestimmt. Abb. 10 und 11 zeigen die resultierenden Trends der LME pro Simulation in einem Diagramm. Eine Verschiebung in den negativen Bereich bei Bezugnahme auf die Referenzkoordinaten wird hier deutlich (Abb. 10.2).

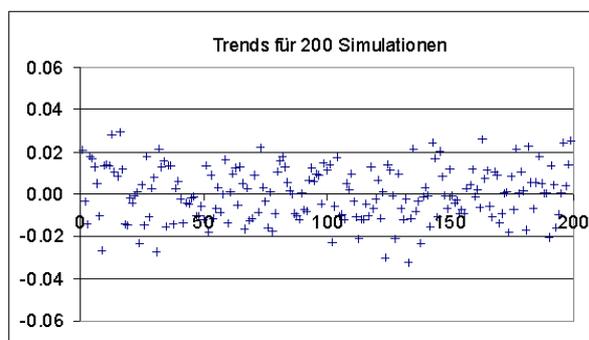


Abb. 10.1: Trend $r=7$ [mm/M]

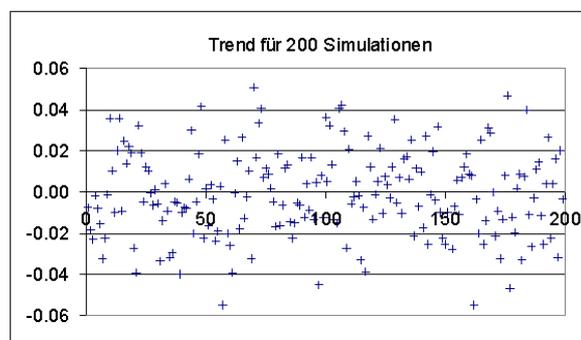


Abb. 11: Trend $r=6 + 3M$ [mm/M]

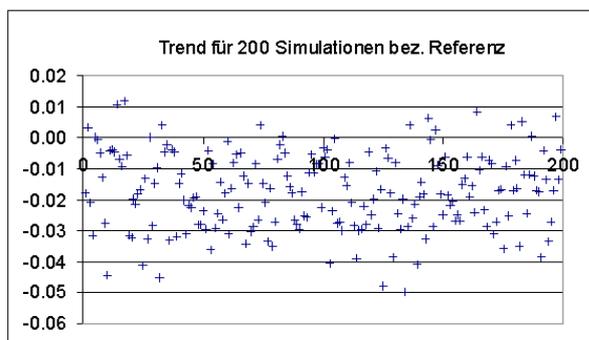


Abb. 10.2: Trend $r=7$ [mm/M]

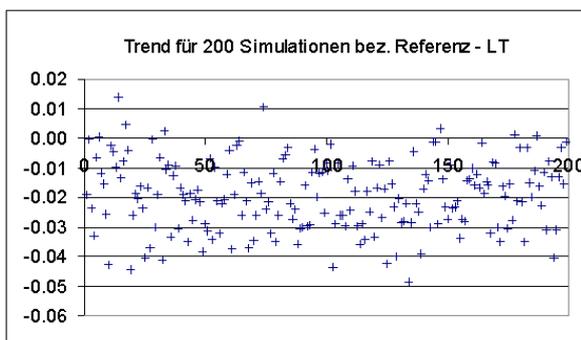


Abb. 12: Trend $r=7$ [mm/M]

Zusammenfassend wurden die LME als RMS-Werte (6) aufgestellt. Es zeigt sich beispielhaft für die Ausgleichung mit Ax.Ori, dass die LME grundsätzlich im Mittel in max. $25\mu\text{m}$ resultieren. Abweichende Ergebnisse (Ausreißer) liegen hier bei max. $34\mu\text{m}$. Betrachtet man hierbei die Mittelwerte bezogen auf den Referenzkoordinatensatz sind wesentlich höhere Ungenauigkeiten im Bereich von $25 - 40\mu\text{m}$ erkennbar. Aufgrund dieser Daten könnte man vermuten, dass die Referenzkoordinaten den längenabhängigen Fehleranteil enthalten. Abb. 12 zeigt die Trends für 200 Simulationen auf einen Referenzkoordinatensatz, der aus einer Laser-Tracker-Messung stammt. Da die Simulationsdaten bezogen auf einen weiteren unabhängigen Referenzdatensatz in ähnlichen Trends (auch hier eine Verschiebung) resultieren, stellt sich weiterhin die Frage nach den auslösenden Faktoren der verbleibenden längenabhängigen

Restfehler in den LME. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Datensätze untereinander gleichartige Ergebnisse liefern, obwohl auch hier Trends von $\pm 30\mu\text{m/m}$ auftreten. Die Verschiebung der LME-Trends in Bezug auf die Referenzkoordinaten stellt jedoch dar, dass grundsätzliche Restfehler in den Daten vorliegen.

$$RMS_{LME} = \sqrt{\frac{\sum l^2}{n}} \quad (6)$$

5 Zusammenfassung

Im Bereich der Untersuchung von Einflüssen auf die photogrammetrische Auswertung liegt noch viel Analysebedarf. Mit dem vorgestellten Simulationsprozess wird es möglich Einzelnflüsse in vielen Wiederholungen in einem wirtschaftlichen Prozess zu untersuchen und ihren Einfluss zu spezifizieren. Die hier dargestellten Ergebnisse zeigen erst den Beginn des Prozesses und der Möglichkeiten. Generierte Simulationen decken zudem teilweise immer wieder neue Problematiken auf. Im Hinblick auf Analysen für die Einflussgrößen sollen weitere Untersuchungen zur Systemfestlegung erfolgen sowie Entwicklungsarbeit in Bezug auf Verifizierungen nach VDI/VDE 2634 geleistet werden. Spezielle Versuche zum Einfluss von Kamerageometrien im funktionalen Modell der Bündelausgleichung werden im Simulationsverfahren zusätzlich berücksichtigt. Durch die erfolgreiche Implementierung der numerischen Simulation für die Nahbereichsphotogrammetrie können für die Zukunft einige interessante Ergebnisse erwartet werden.

6 Literaturverzeichnis

- COX, M. G., DANTON, M. P., HARRIS, P. M. (2001): Software Specifications for Uncertainty Calculation and Associated Statistical Analysis; NPL Report CMSC 10/01
- COX, M. G., DANTON, M. P. (2004): Software Specifications for Uncertainty Evaluation; NPL Report CMSC 40/04 (CMSC 10/01 revised)
- HASTEDT, H., LUHMANN, TH., TECKLENBURG, W. (2002): Image-variant interior orientation and sensor modelling of high-quality digital cameras; ISPRS Congress Com. V, Corfu
- Robert, C. P., Casella, G. (2002): Monte Carlo Statistical Methods; Springer-Verlag
- SCHMITT, G. (1977): Monte-Carlo-Design geodätischer Netze; AVN(84), 87-94, Heft 3/1977
- SCHWENKE, H. (1999): Abschätzung von Meßunsicherheiten durch Simulation an Beispielen aus der Fertigungsmeßtechnik; PTB-Bericht: F-36
- VDI/VDE 2634 (2001): Optical 3-D measuring systems – Imaging systems with point-by-point probing, VDI, Düsseldorf

Verifizierung von Simulationsmodellen für Fahrzeugsicherheitsversuche

KARSTEN RAGUSE, PETER DERPMANN-HAGENSTRÖM & PETER KÖLLER¹

Zusammenfassung: Bei der Entwicklung von Fahrzeugen in der Automobilindustrie werden Sicherheitsversuche zur Überprüfung des Insassenschutzes und der Strukturverformung durchgeführt. Parallel zu diesen Versuchen werden bereits in einer frühen Entwicklungsphase Berechnungen erstellt, die das Verhalten der Dummies und des Fahrzeuges während eines Versuches simulieren. Die Berechnungsergebnisse werden mit den Ergebnissen der Versuche verglichen und darüber verifiziert. Mit dem Ziel, derartige Vergleiche leicht verständlich visualisieren zu können, wurde das Werkzeug Animator 3ax realisiert, welches eine synchronisierte Überlagerung der Berechnungsanimationen und der Filme eines Versuchs ermöglicht. Damit sind eventuelle Unstimmigkeiten zwischen der Simulation und dem Versuch ohne weitere Analysen direkt und leicht zu erkennen.

Um eine präzise Überlagerung der Bildinformationen durch einen Bezug zu der räumlichen Position und den optischen Eigenschaften der eingesetzten Highspeed-Kameras zu erreichen, ist es erforderlich, die Filmsequenzen des Sicherheitsversuchs mit photogrammetrischen Methoden dreidimensional auszuwerten.

1 Einleitung

Die Automobilindustrie weist durch Sicherheitsversuche wie Crashtests nach, dass die von ihr produzierten Fahrzeuge einen hohen Standard hinsichtlich der Unfallsicherheit erfüllen. Bei diesen Sicherheitsversuchen wird die Bildinformation der sehr schnell ablaufenden Bewegungsvorgänge mit digitalen Highspeed-Kameras erfasst und über Methoden der digitalen Bildverarbeitung und Bildmesstechnik ausgewertet (KÖLLER ET AL., 1993; PHILIPPENS, 2003). Die Auswertung dieser Filme bildet eine wichtige Grundlage für die qualitative und quantitative Bewertung der komplexen Vorgänge bei der Insassenbewegung und Deformation in der Fahrzeugstruktur. Gleichberechtigt werden für diese Analysen auch Simulationsmodelle mit zugehörigen Animationen der Insassenbewegungen und der Strukturverformungen erstellt. Diese werden mit den realen Ergebnissen aus den Crashversuchen verglichen und darüber verifiziert (STREILEIN & HILLMANN, 2002). Der Vergleich geschieht bisher unter anderem durch eine parallele Darstellung der Filme und der Berechnungsanimationen auf unterschiedlichen Systemen. Mit der Realisierung des Programmsystems Animator 3ax wurde die zusätzliche Möglichkeit geschaffen, diesen Vergleich nun durch eine präzise überlagerte Darstellung der beiden Bildinformationen durchzuführen. Damit wird eine Bewertung genauer und einfacher.

Die in diesem Rahmen erforderlichen Anpassungen bei der Versuchsdurchführung und im Auswerteablauf werden im Folgenden erläutert.

¹ Volkswagen AG, Forschung und Entwicklung, EZTV, Brieffach 1788, 38436 Wolfsburg
Dipl.-Ing. Karsten Raguse, e-mail: karsten.raguse@volkswagen.de
Dipl.-Phys. Peter Derpmann-Hagenström, e-mail: peter.derpmann@volkswagen.de
Dipl.-Math. Peter Köller, e-mail: peter.koeller@volkswagen.de

2 Berechnung und Animation

Im Rahmen der Pkw-Entwicklung werden in der Simulation diverse Variationen der Fahrzeugmodelle erstellt und berechnet. Anhand der Ergebnisse werden auch ihre Auswirkungen auf die Fahrzeugsicherheit bewertet. Zur Verifizierung dieser Modelle werden u. a. die Animationen der simulierten Crashszenarien (vgl. Abbildung 1) mit den Filmen der Sicherheitsversuche verglichen. Aufgrund der Resultate dieses Vergleichs werden Verbesserungen an den weiteren Berechnungsmodellen der Entwicklungsreihe vorgenommen. Es wird damit angestrebt, die Berechnungsmodelle so zuverlässig, präzise und aussagekräftig weiterzuentwickeln, dass durch verstärkten Einsatz der Simulation die Anzahl der kosten- und zeitintensiven Crashversuche reduziert werden kann.

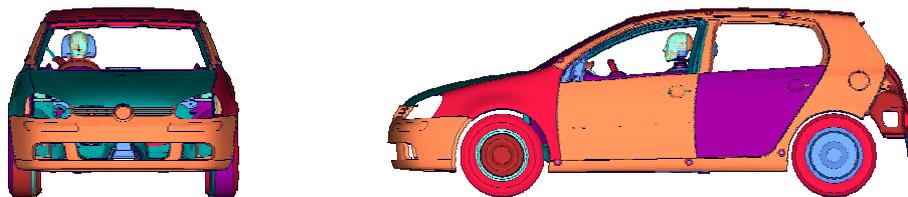


Abb. 1: Berechnungsanimationen

Durch die stetig steigende Leistungsfähigkeit der Simulationsverfahren und der eingesetzten Rechner wird sich das Verhältnis zwischen simulierten und realen Crashversuchen mehr in Richtung Simulation verschieben (AKGÜN, 2000). Deshalb sind zuverlässige Werkzeuge notwendig, die den Vergleich zwischen Simulation und Versuch vereinfachen und verbessern. Bei einer geringeren Anzahl von Crashversuchen müssen dem Anwender für die Verifizierung robuste, exakte und aussagekräftige Methoden und Werkzeuge zur Verfügung stehen. Für die Überlagerung der Berechnungsanimation mit den Filmen der Sicherheitsversuche ist es erforderlich, dass die zeitliche Auflösung der Berechnungsanimationen mit den Bildraten der Filmsequenzen übereinstimmt. Die Crashfilme werden typisch mit einer Bildrate von 1000 Bildern pro Sekunde aufgenommen. Die Berechnungsanimationen müssen somit ebenfalls mit einer zeitlichen Auflösung von 1 ms oder ganzzahligen Vielfachen davon erzeugt werden. Je nach Komplexität der Berechnungsanimationen entstehen für sie Datenmengen von etwa 1 - 4 GByte.

3 Fahrzeugvorvermessung und Fahrzeugsicherheitsversuch

Um später mit dem Programmsystem Animator 3ax einen Vergleich zwischen der Simulation und dem Versuch vornehmen zu können, müssen einige Vorbereitungen im Umfeld des Crashversuches durchgeführt werden. Zur Ermittlung der dynamischen, positionsbezogenen Vorgänge im Versuch und ihrer späteren räumlichen Zuordnung zum Fahrzeugmodell werden interessierende und für die Auswertung erforderliche Punkte am Fahrzeug und den Dummies durch Zielmarken signalisiert. Dazu werden verschiedene Zielmarkentypen genutzt (vgl. Abbildung 2). Untersuchungen der Messunsicherheit im Einzelbild für diese Markentypen (KÖLLER & SCHRADER, 1996) haben gezeigt, dass bei ausreichendem Markendurchmesser die Positionen zuverlässig und robust mit einer Genauigkeit von etwa 1/10 Pixel im Bild bestimmt werden können.

Die Koordinaten der Mittelpunkte ausgewählter Marken werden in einer statischen Fahrzeugvorvermessung im Fahrzeugkoordinatensystem bestimmt. Die Erfassung kann über her-

kömmliche Koordinatenmesstechnik mit einem taktilen Messtaster oder photogrammetrische Aufnahmesysteme erfolgen (WESTER-EBBINGHAUS & WEZEL, 1985; RENTSCHLER & UFFENKAMP, 1999).

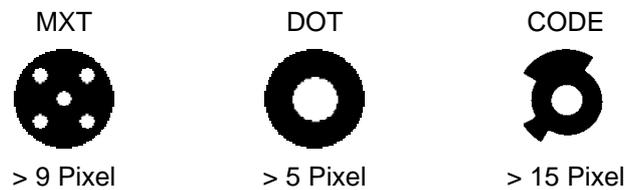


Abb. 2: Mindestdurchmesser der Zielmarkentypen

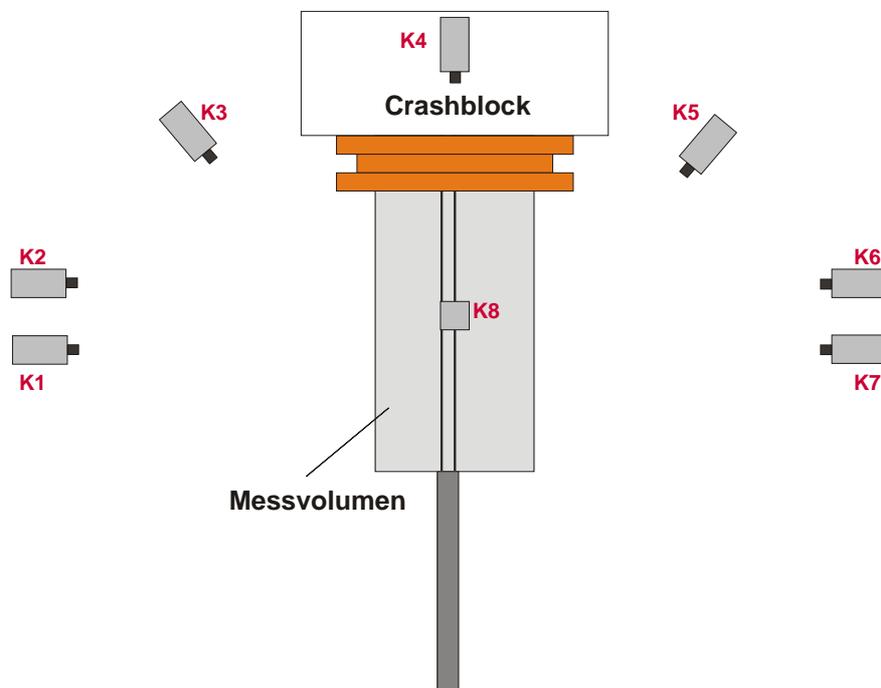


Abb. 3: Aufnahmeconfiguration beim Crashversuch

Zurzeit werden die Crashversuche bei Volkswagen mit einem Verband von acht Kameras aufgenommen, die räumlich verteilt um das Messvolumen in einem Halbverband angeordnet sind (vgl. Abbildung 3). Die eingesetzten Kameras sind digitale Highspeed-Kameras, die mit einer Bildrate von 1000 Bildern pro Sekunde arbeiten. Sie besitzen eine Ortsauflösung von bis zu 1504 x 1128 Pixel mit einer Pixelgröße von 12 µm. Das Fahrzeug bewegt sich im Versuch zum Zeitpunkt des Aufpralls mit einer Geschwindigkeit von bis zu 18 m/s. Für die präzise Auswertung dieses hochdynamischen Vorgangs ist es erforderlich, dass die Kameras die Einzelbilder exakt synchron aufnehmen. Asynchronitäten im Kameraverbund wirken sich als Ungenauigkeiten bei der 3D-Koordinatenbestimmung der Zielpunkte auf dem Fahrzeug aus. Die notwendige Synchronisation der Kameras erfolgt über externe Taktgeber.

Die Kalibrierung der eingesetzten Kameras wird im Vorfeld des Versuches durchgeführt. Für die Kamerakalibrierung wird ein dreidimensionales Testfeld genutzt und in der bekannten Aufnahmeconfiguration aus vier konvergenten und vier gekanteten Aufnahmen (AICON, 2002), erfasst. Die Ermittlung der Parameter der inneren Orientierung erfolgt nach dem Brown'schen Ansatz (BROWN, 1971). Bei den derzeitigen Kamera- und Objektivtypen sowie den aktuellen Genauigkeitsanforderungen wird neben der Hauptpunktverschiebung nur die radialsymmetrische Verzeichnung mitbestimmt. Die Auswirkungen der anderen Parameter der inneren Orientierung sind nicht signifikant und werden deshalb in der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt. Da für die 3D-Filmauswertung zurzeit nur die ortsfesten Kameras genutzt werden, können die in der Kamerakalibrierung ermittelten Parameter der inneren Orientierung für die Aufnahmesequenz als konstant angenommen werden.

Die Verfolgung der Marken in den Filmsequenzen erfolgt halbautomatisch mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung (KÖLLER ET AL., 1993). Aus den gemessenen Bildkoordinaten der Zielmarken im Einzelbild werden über die photogrammetrische Auswertung die dreidimensionalen Koordinaten der Punkte im ortsfesten Koordinatensystem bestimmt. Die eingesetzten Methoden beruhen auf einem kombinierten Verfahren aus räumlichem Rückwärts- und Vorwärtsschnitt (LUHMANN, 2003). Zunächst werden die Kamerapositionen durch einen räumlichen Rückwärtsschnitt über Passpunkte im Hallenkoordinatensystem der Crashanlage bestimmt. Die Koordinaten der Zielmarken auf Fahrzeug und Dummies werden im Weiteren von den Kamerastandpunkten aus über einen räumlichen Vorwärtsschnitt ermittelt.

Die Auswertung dieser Filmsequenzen liefert von jedem der Zielpunkte eine 3D-Trajektorie. Der Verlauf dieser Trajektorien gibt die Bewegung des jeweiligen Punktes im Hallenkoordinatensystem während des Crashversuches wieder.

4 Kopplung von Simulation und Versuch

Um die Welten von Simulation und Versuch näher zusammenzubringen, ist neben der Bereitstellung der eingeführten Koordinatensysteme auch die der jeweils vertrauten Benutzeroberflächen wichtig. Dazu wurde das etablierte Visualisierungstool Animator aus der Simulation in das System MovXact zur Crashfilmauswertung integriert.

Für die überlagerte Darstellung müssen die zugehörigen Datensätze zum einen in ein einheitliches Koordinatensystem transformiert werden, zum anderen muss die Abbildungsgeometrie während der Aufnahme der Crashfilmsequenzen berücksichtigt und modelliert werden.

4.1 Kopplung der Programmsysteme

Das System Animator der Firma GNS mbH dient zur Animation von Berechnungsmodellen. Eine präzise 2D/3D-Positionsauswertung in Bildsequenzen mit Methoden der Bildmesstechnik, sowie die Darstellung von Zeitverläufen der Messsignale und Bildsequenzen, ermöglicht das Werkzeug MovXact der Firma FalCon GmbH. Das Programmsystem Animator 3ax ist eine Integration von Animator in Form eines ActiveX-Controls in die Umgebung des Programms MovXact, bei der die Funktionalität beider Komponenten erhalten bleibt.

Die Bedienoberfläche ist an die Filmauswertesoftware MovXact angelehnt. Es besteht allerdings die Option, die Oberfläche von Animator alternativ zu benutzen. Somit stehen den Anwendergruppen der Berechner und Versuchingenieure die jeweils bekannten Benutzeroberflächen zur Verfügung. Dieses erleichtert die Nutzung des Programmsystems und unterstützt die Arbeiten in bereichsübergreifenden Projektteams.

Das Programmsystem Animator 3ax wurde im Auftrag der Automobilfirmen Volkswagen AG, Audi AG und Porsche AG entwickelt. Die Programmentwickler sind die Firmen GNS mbH und FalCon GmbH, vertreten durch das Ingenieurbüro Dr. Gerhard.

4.2 Koordinatentransformation der Ergebnisse der 3D-Filmauswertung

Für die Überlagerung der Bildinformationen aus Simulation und Versuch ist es notwendig, dass die Datensätze im gleichen Koordinatensystem vorliegen. In den Prozessabläufen der Fahrzeugentwicklung werden für die einzelnen Datensätze bisher allerdings unterschiedliche Koordinatensysteme genutzt. Die Berechnungsanimationen werden im Fahrzeugkoordinatensystem erzeugt, die Ergebnisse der 3D-Filmauswertung liegen im ortsfesten Hallenkoordinatensystem der Crashanlage vor.

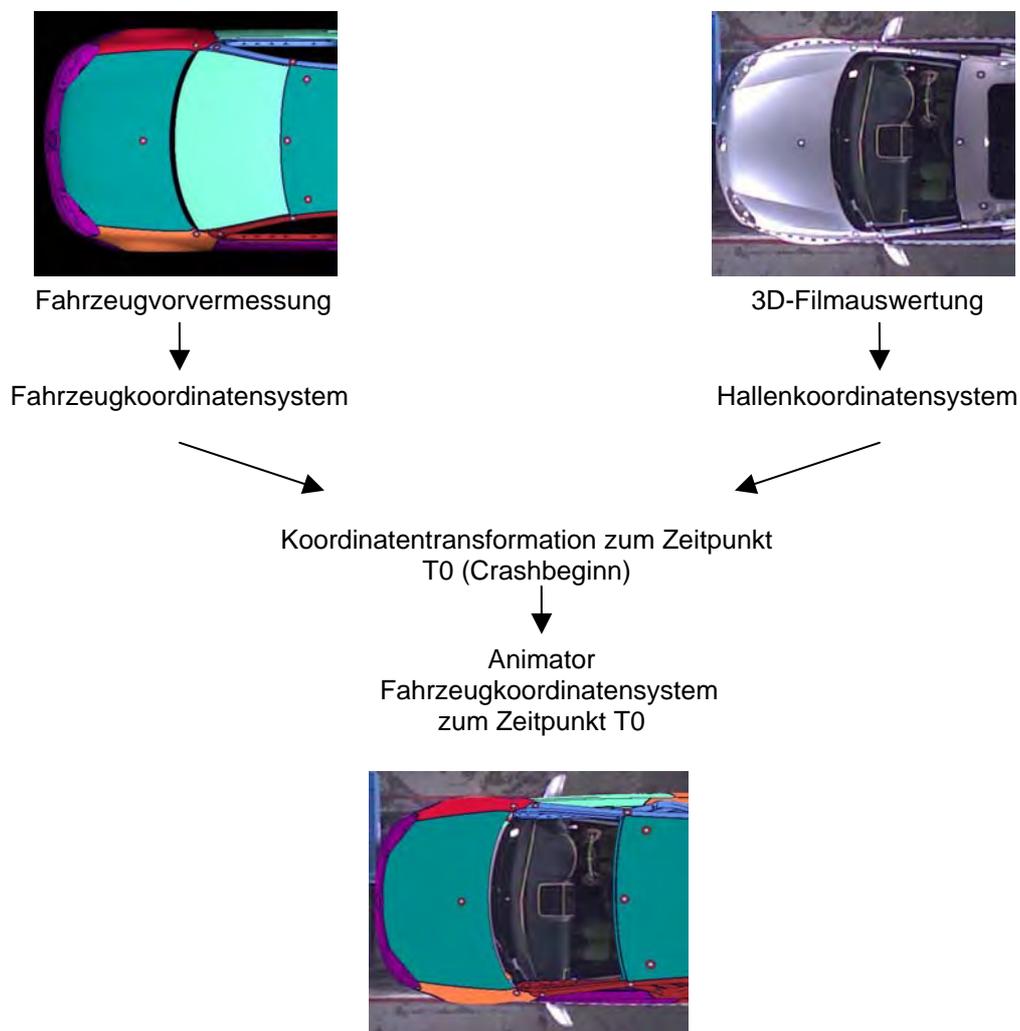


Abb. 4: Ablaufschema der Koordinatentransformation / Überlagerung

Für die notwendige Koordinatentransformation werden ausgewählte, signalisierte Punkte auf dem Fahrzeug genutzt. Die Fahrzeugkoordinaten dieser Punkte werden im Vorfeld des Versuches in der statischen Fahrzeugvorvermessung ermittelt. Weiterhin werden die Koordinaten dieser Punkte im Hallenkoordinatensystem während des Crashversuchs im Rahmen der

3D-Filmauswertung dynamisch bestimmt. Die Transformationsparameter zwischen dem ortsfesten Hallenkoordinatensystem und dem mitgeführten Fahrzeugkoordinatensystem werden für einen definierten Zeitpunkt ermittelt. Da für die Transformation nur Koordinaten von Marken in undefor mierten Bereichen des Fahrzeugs benutzt werden können, wird der Zeitpunkt T_0 (Crashbeginn) als Transformationszeitpunkt genutzt. Zu diesem Zeitpunkt wird das Fahrzeugkoordinatensystem im Hallenkoordinatensystem verankert und die Transformation durchgeführt. Die Ergebnisse der Filmauswertung (Kameraposition und Trajektorienverläufe) können damit zeitabhängig transformiert werden. Die Überlagerung im Programmsystem Animator 3ax erfolgt im „Fahrzeugkoordinatensystem zum Zeitpunkt T_0 “. Das Ablaufschema dieser Prozedur ist in Abbildung 4 dargestellt.

4.3 Berücksichtigung der Abbildungsgeometrie

Neben der Transformation in ein einheitliches Koordinatensystem müssen die Parameter der inneren Orientierung der eingesetzten Highspeed-Kameras sowie auch die zentralperspektivische Abbildung berücksichtigt werden. Die Berechnungsanimation ist standardmäßig eine telezentrische Abbildung ohne Einflüsse von Abbildungsfehlern. Die Filmsequenzen der Versuche sind dagegen zentralperspektivisch und beinhalten die Effekte der Verzeichnungsparemeter und der Hauptpunktverschiebungen der eingesetzten Kameras. Die notwendige Anpassung der beiden Datensätze erfolgt in zwei getrennten Arbeitsschritten. Im Programm Animator 3ax werden die Einzelbilder hinsichtlich der Parameter der inneren Orientierung der Kameras, wie Einflüsse der Verzeichnungsparemeter und der Hauptpunktverschiebung, korrigiert (vgl. Abbildung 5). Im rechten Bild der Abbildung ist oben und links deutlich der graue Bereich zu sehen, der durch die Berücksichtigung der Hauptpunktverschiebung zustande kommt.



Abb. 5: Auswirkungen der Korrektur der Parameter der inneren Orientierung
(links unkorrigiert, rechts korrigiert)



Abb. 6: Auswirkungen der Umrechnung von telezentrischer Perspektive in Zentralperspektive
(links: Telezentrie, rechts: Zentralperspektive)

Die perspektivischen Einflüsse zum Zeitpunkt der Filmaufnahmen werden der Berechnungsanimation aufgeprägt, d.h. die telezentrische Darstellung wird in eine zentralperspektivische umgerechnet (vgl. Abbildung 6). Für die Umrechnung der Perspektive wird neben der Kamerakonstanten weiterhin die Sensorgröße der Kamera genutzt.

Erst durch die Berücksichtigung und Modellierung der Abbildungsgeometrie wird die exakte Überlagerung der Bildinformationen ermöglicht. Die weiterhin sichtbaren Unterschiede bei der Überlagerung sind dann nicht mehr durch algorithmische Effekte zu begründen, sondern sind echte Abweichungen zwischen der Simulation und dem Crashversuch.

5 Vergleich zwischen Simulation und Versuch

Durch die Überlagerung können Unterschiede zwischen der Berechnungsanimation und der Bildinformation der Filme direkt erkannt und bewertet werden. Weiterhin besteht die Option, nur ausgewählte Komponenten des Fahrzeugs in der Berechnungsanimation dem Crashfilm zu überlagern. Der Anwender erhält die Möglichkeit, spezielle Konstellationen zu analysieren, wie er sie in der Darstellung in getrennten Systemen nicht untersuchen könnte. Als Beispiel für diese Art der Betrachtung ist in Abbildung 7 die Berechnungsanimation des Fahrer-Dummies den jeweiligen Filmsequenzen überlagert. Durch diese Darstellung in der Seiten- und der Aufsicht kann der Bewegungsverlauf des simulierten Insassen direkt verifiziert werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, das gesamte Simulationsmodell oder Teile davon, transparent oder als Drahtmodell, darzustellen. Einzelne Komponenten können ein- oder ausgeblendet werden. Neben der Überlagerung von Berechnungsanimationen und Filmsequenzen können auch Messwertdiagramme als zusätzliche Information dargestellt werden. Sie werden im Programm Animator 3ax ebenfalls mit einem visualisierten Zeitbezug zu den anderen Darstellungen angezeigt.

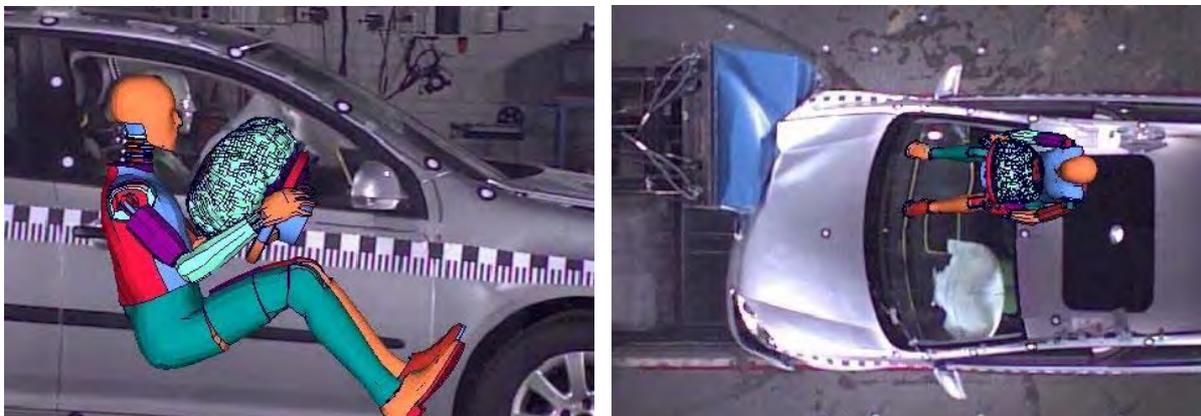


Abb. 7: überlagerte Darstellung des Fahrer-Dummies (links Seitenansicht, rechts Aufsicht)

6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Programm Animator 3ax wurde die Möglichkeit geschaffen, den Vergleich zwischen Simulations- und realen Versuchsergebnissen über eine leistungsfähige Visualisierung zu verbessern. Durch die Kombination mit den bereits vertrauten Analyseverfahren kann eine weitere Erleichterung im Arbeitsprozess der Fahrzeugentwicklung erwartet werden. Das Verständnis für den Abgleich zwischen Simulation und Versuch kann durch diese neue Bewertungsmöglichkeit erhöht werden. Die gut verständliche Vergleichsform unterstützt Entscheidungsprozesse bei der Fahrzeugentwicklung.

Die dargestellten Ergebnisse wurden mit einer ersten Version des Animator 3ax erzeugt. Zukünftige Erweiterungen des Programms im Bereich der Datenschnittstellen zu den Versuchsdatenbanken sowie weitere Verbesserungen der Handhabbarkeit werden die Integration des Programmsystems in den Prozessablauf der Fahrzeugentwicklung zunehmend vorantreiben. Weiterhin wird angestrebt, die aus Crashversuch und -simulation erhaltenen Signalzeitverläufe in strukturelle Signalmodelle zu überführen, die dann mit algorithmischen Methoden auf den Grad ihrer Übereinstimmung verglichen werden können.

7 Literatur

- AICON, 2002: Hinweise zur Kalibrierung von Kameras mit einer AICON Kalibriertafel. Arbeitsdokumentation AICON 3D Systems GmbH, Braunschweig.
- AKGÜN, T., 2000: Wie realistisch ist die Wirklichkeit in der Crash-Simulation. Automotive Engineering Partners 6/2000, S. 50-52.
- BROWN, D.C., 1971: Close-Range Camera Calibration. Photogrammetric Engineering 37(8), S. 855-866.
- KÖLLER, P., REHFELD, N., GERHARD, A., 1993: Automatische Auswertung der Filmbildsequenzen von Crashversuchen unter Einsatz der digitalen Bildverarbeitung. Proceedings of MessComp 1993: Messen und Verarbeiten elektrischer und nichtelektrischer Größen, S. 85-91.
- KÖLLER, P., SCHRADER, K., 1996: Beurteilung des Fehlers bei der Positionsbestimmung von Messmarken aus verlustbehaftet komprimierten Crashbildsequenzen. In Bonfig, K.W. (Hrsg.): Messtechnik und Messsignalverarbeitung. MessComp 1996, S. 73-78.
- LUHMANN, T., 2003: Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen, 2. überarbeitete Auflage, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- PHILIPPENS, M., 2003: 3D High Speed Video Photogrammetry – seeing is believing. TNO Automotive – By the Way, S. 13-14.
- RENTSCHLER, W., UFFENKAMP, V., 1999: Digital Photogrammetry in Analysis of Crash Tests. SAE Technical Paper Series 1999-01-0081.
- STREILEIN, T., HILLMANN, J., 2002: Stochastische Simulation und Optimierung am Beispiel VW Phaeton. VDI-Tagung: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau, Würzburg.
- WESTER-EBBINGHAUS, W., WEZEL, U.E., 1985: Photogrammetrische Vermessung von Crashfahrzeugen. Automobil-Industrie Nr. 1/85, Vogel-Verlag, Würzburg, S. 49-53.

Kalibrierung von Laserscannern

ANDREAS RIETDORF¹ & FRANK GIELSDORF²

Zusammenfassung: In diesem Beitrag wird ein Modell zur Kalibrierung von scannenden Messinstrumenten, die nach dem Theodolitmessprinzip arbeiten, vorgestellt. Zu diesen Messsystemen gehören einige Modelle der aktuell auf dem Markt befindlichen Laserscanner. In dem hier vorgestellten Kalibrierungsansatz wird auf den Einsatz von diskreten Punkten als Passpunkte (Kugeln, Zieltafeln, o.ä.) verzichtet. Die Bestimmung der Kalibrierparameter des Messsystems und eine Abschätzung der Genauigkeiten der einzelnen Komponenten erfolgt in einem dreidimensionalen Testfeld, welches aus Ebenen besteht. Dabei wird das ungünstige Reflektionsverhalten vermieden, welches zum Beispiel beim Einsatz von Kugeln als Referenzpunkte entsteht und die hohe Punktdichte des Laserscanners wird ausgenutzt. Neben der Erläuterung des allgemeinen Fehlermodells für diese Art der polaren Messinstrumente und der Vorstellung des mathematischen (funktionalen) Modells, wird auf den an der TU Berlin realisierten Versuchsaufbau sowie auf den Ablauf der Kalibrierung und erste Ergebnisse eingegangen.

1 Einleitung

Die Bedeutung und Akzeptanz von terrestrischen scannenden Messverfahren hat in den letzten Jahren erheblich zugenommen, einen Innovationsschub gab es zuletzt durch die Kombination der Scannererfassung mit digitalen Bildern, die neben der visuellen Darstellung auch eine Messung in der Punktwolke ermöglicht (KERN, 2003). Allein die verhältnismäßig teuren Anschaffungskosten in Hard- und Software halten viele Ingenieurbüros davon ab, diese Technik vermehrt zu nutzen.

Auf der anderen Seite steht der Nutzer dieser Instrumente vor der Problemstellung, beurteilen zu können, welches Genauigkeitspotential in den auf den Markt drängenden neuen Instrumenten enthalten ist. Die systematischen Effekte eventuell vorhandener Instrumentenfehler der scannenden Messinstrumente (Laserscanner, reflektorlos messende Tachymeter, ...) haben einen großen Einfluss auf die Produkte dieser Messverfahren. Die Ergebnisse, die aus einer oder mehreren Aufnahmen (Scans) mit diesen Sensoren erhalten werden, sind primär Punktwolken $(X, Y, Z)_i$ der in einem Scan aufgenommen Punkte P_i , die nachfolgend meist zu geometrischen Primitiven als strukturierte Geometrielemente weiterverarbeitet werden. Um den systematischen Einfluss der Instrumentenfehler gering zu halten, sind entsprechende Kalibrierverfahren anzuwenden, mit deren Hilfe die Instrumentenfehler zu bestimmen (INGENSAND et al. 2003) und an die Messwerte anzubringen sind. Ebenfalls wird mit diesen Kalibrierverfahren die Möglichkeit eröffnet, eine von den Herstellern unabhängige Aussage über die Genauigkeitsangaben für den jeweiligen Sensor zu treffen, bzw. überhaupt erst einen Vergleich mit den Herstellerangaben zu ermöglichen (BOEHLER et al. 2003).

¹ Dipl.-Ing. Andreas Rietdorf, Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik, Technische Universität Berlin, Sekr. H20, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin, Tel. +49 (0)30 314 - 23315, email: rietdorf@fga.tu-berlin.de

² Dr.-Ing. Frank Gielsdorf, Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik, Technische Universität Berlin, Sekr. H20, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin, Tel. +49 (0)30 314 - 22374, email: gielsdorf@fga.tu-berlin.de

2 Fehlermodell

Dem geometrischen Modell der Kalibrierung liegt die Annahme zugrunde, dass die auftretenden Instrumentenfehler denen einer geodätischen Totalstation entsprechen.

Das instrumenteneigene polare Koordinatensystem wird durch eine vertikale Drehachse (Stehachse VV), eine horizontale Drehachse (Kippachse HH) sowie durch den Laserstrahl (Zielachse ZZ) realisiert.

Die gegenseitige Lage dieser drei Achsen im Raum lässt sich durch 6 Parameter - drei Translationen und drei Rotationen - beschreiben. Die Winkel werden in einer Projektionsebene gemessen, die zu den jeweils betrachteten Achsen parallel ist.

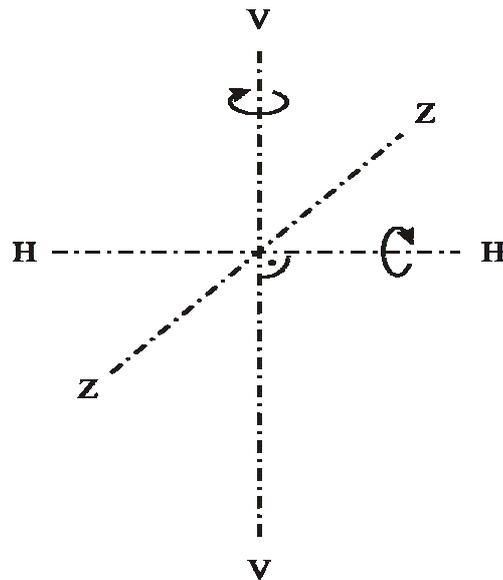


Abb. 1: Achsbedingungen bei tachymetrischen Messsystemen

Die Translationen sind definiert zu:

- e_{vh} : Orthogonaler Abstand Stehachse – Kippachse
- e_{vz} : Orthogonaler Abstand Stehachse – Zielachse
- e_{hz} : Orthogonaler Abstand Kippachse – Zielachse

und die Rotationen beschreiben folgende Winkel:

- α_{vh} : Winkel zwischen Stehachse und Kippachse
- α_{vz} : Winkel zwischen Stehachse und Zielachse
- α_{hz} : Winkel zwischen Kippachse und Zielachse

Für die Winkel gelten die Beziehungen:

- $\alpha_{vh} + v_{vh} = 100\text{gon}$ v_{vh} : Kippachsenfehler
- $\alpha_{vz} = \zeta + v_{\zeta}$ v_{ζ} : Höhenindexfehler, ζ : gemessener Zenitwinkel
- $\alpha_{hz} + v_{hz} = 100\text{gon}$ v_{hz} : Zielachsenfehler

Um auch für die Distanzmessung entsprechende Kalibrierwerte bestimmen zu können, wurden für den Streckenmessteil eine Additionskonstante und ein Maßstab modelliert:

- $= a + s_{\text{gemessen}} \cdot m$ s_{ist} : Soll-Strecke
- a : Additionskonstante
- s_{gemessen} : gemessene Strecke
- m : Maßstab

Im Rahmen der Instrumentenkalibrierung sind die Parameter e_{vh} , e_{vz} , e_{hz} , v_{vh} , v_{ζ} , v_{hz} , a sowie m zu bestimmen und auf Signifikanz zu überprüfen.

Die Komponenten des Stehachsenfehlers ζ und η , d.h. die Abweichung der Stehachse des Instrumentes aus der Lotrechten, werden im vorliegenden Modell nicht als instrumentenspezifische Fehler betrachtet, sondern vielmehr als standpunktspezifische Orientierungsparameter. Sie werden daher für jede Aufstellung separat bestimmt.

3 Funktionales Modell

3.1 Rotationen in Quaternionendarstellung

Für die funktionale Beschreibung von Rotationen werden im vorliegenden Modell Quaternionen verwandt. Dies trifft sowohl auf die rotatorischen Kalibrierungsparameter v_{vh} , v_{ζ} , v_{hz} als auch auf die Orientierungsparameter des Instrumentes ζ , η , ω zu.

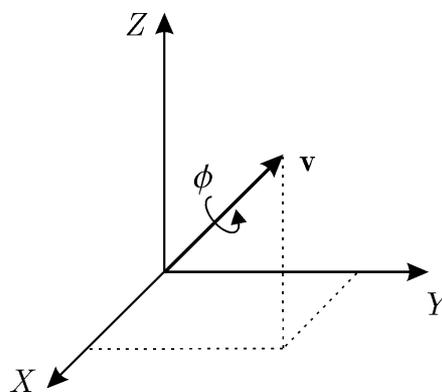


Abb. 2: Geometrische Anschauung Quaternion

Die Quaternionen sind eine Verallgemeinerung der komplexen Zahlen. Die Verwendung von Quaternionen für die Beschreibung von Rotationen bietet gegenüber herkömmlichen Rotationsmatrizen entscheidende Vorteile. So kann eine Rotation durch nur 4 Parameter beschrieben werden. Es verbleibt lediglich ein Freiheitsgrad, der durch die Normierung des Quaternionen beseitigt wird. Die resultierenden Bedingungsgleichungen sind bilinear, daher lassen sich die ausgeglichenen Parameter ohne Kenntnis von Näherungswerten berechnen. Für weitere Ausführungen zu Quaternionen sei auf (HORN, 1987) verwiesen.

3.2 Ausgleichungsansatz

Üblicherweise werden Achsfehler von Theodoliten bestimmt, indem diskrete Punkte in zwei Fernrohrlagen angezielt werden. Eine solche Messungsanordnung ist jedoch für Laserscanner nicht realisierbar, da sich diskrete Punktpositionen des Laserstrahls aus konstruktiven Gründen nicht reproduzieren lassen. Als Abhilfe greift man im Allgemeinen auf Zielkugeln zurück, deren Zentren wiederum diskrete Punkte sind. Diese Lösung kann aber durch das ungünstige Reflektionsverhalten am Rand der Kugeln zu Problemen führen (Kometenschweif), weiterhin wird die hohe Punktdichte des Laserscanners dabei nicht ausgenutzt.

Im hier beschriebenen Verfahren wird daher eine andere Messungsanordnung genutzt. Anstatt identischer Punkte werden identische Ebenen von unterschiedlichen Scannerstandpunkten aus angemessen. Aus der großen Menge der Beobachtungswerte lassen sich mit Hilfe einer Ausgleichung Ebenen-, Standpunkt- und Instrumentenparameter schätzen.

Beobachtungen:

s	Strecken	}	I
r	Richtungen		
ζ	Zenitwinkel		

Unbekannte Ebenenparameter:

\mathbf{n}_g	Normalenvektor	}	x_E
d_g	orthogonaler Abstand vom Ursprung		

Unbekannte Standpunktparameter:

\mathbf{t}_g	Standpunktkoordinaten	}	x_S
q	Quaternion \rightarrow Orientierung, Stehachsenschiefe		

Unbekannte Instrumentenparameter:

v_{vh}	Kippachsenfehler	}	x_I
v_ζ	Höhenindexfehler		
v_{hz}	Zielachsenfehler		
a	Additionskonstante		
m	Maßstab		
e_{vh}	Exzentrizität Kippachse – Stehachse		
e_{vz}	Exzentrizität Zielachse – Stehachse		
e_{hz}	Exzentrizität Zielachse – Kippachse		

Das Modell ist vergleichbar einer photogrammetrischen Bündelblockausgleichung, nur dass hier nicht die Orientierungsparameter von Richtungsbüscheln anhand identischer Punkte, sondern die Orientierungen von polaren Koordinatensystemen anhand identischer Ebenen bestimmt werden. Die globalen Koordinaten eines angemessenen Punktes lassen sich als Funktion der oben definierten Beobachtungen und Unbekannten darstellen.

$$\mathbf{x}_g = g(\mathbf{I}, \mathbf{x}_{SP}, \mathbf{x}_I) \quad (6)$$

Für die Ausgleichung kommt das Gauß-Helmert-Modell – bedingte Ausgleichung mit Unbekannten und Bedingungen zwischen den Unbekannten – zum Einsatz. Die Restriktionen sorgen für die Normierung der Quaternionen und der Normalenvektoren.

$$\begin{aligned} f(\bar{\mathbf{I}}, \bar{\mathbf{x}}) &= s_1 \\ h(\bar{\mathbf{x}}) &= s_2 \end{aligned} \quad (7)$$

Die Bedingungsgleichungen sind in diesem Fall Formgleichungen von Ebenen, in welche die globalen Punktkoordinaten \mathbf{x}_g und die Ebenenparameter \mathbf{x}_E eingehen.

$$\begin{aligned} \vec{n}_g \cdot \vec{x}_g - d &= 0 \\ f(\mathbf{x}_g, \mathbf{x}_E) & \end{aligned} \quad (8)$$

Die Substitution von (6) in (8) liefert dann

$$f(g(\mathbf{I}, \mathbf{x}_{SP}, \mathbf{x}_I), \mathbf{x}_E) = 0. \quad (9)$$

Nach der Linearisierung lassen sich die Unbekannten berechnen:

$$\mathbf{x} = \left(\mathbf{A}^T \underbrace{(\mathbf{B}^T \mathbf{Q}_{II} \mathbf{B})^{-1}}_{\mathbf{P}} \mathbf{A} \right)^{-1} \mathbf{A}^T \underbrace{(\mathbf{B}^T \mathbf{Q}_{II} \mathbf{B})^{-1}}_{\mathbf{P}} \mathbf{w} \Rightarrow \mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{w}. \quad (10)$$

Da die partiellen Ableitungen von (9) nach den Beobachtungen und Unbekannten zu sehr komplizierten Ausdrücken führen, wird die Differentiation im Programm numerisch durchge-

führt. Die Datumsfestlegung erfolgt, indem die Orientierungsparameter eines Standpunktes festgehalten werden, oder aber über die Einführung von bekannten, hochgenau bestimmten Kalibrierebenen.

Neben den Kalibrierungsparametern des Instrumentes betrifft eine weitere Fragestellung dessen Beobachtungsgenauigkeit. Um diese zu bestimmen wird nach jeder Ausgleichung eine Varianzkomponentenschätzung durchgeführt, deren Ergebnisse zur Korrektur der a priori Standardabweichungen dienen. Das Ergebnis der Berechnung sind neben signifikanten Kalibrierungsparametern auch die Standardabweichungen der Beobachtungsgruppen *Richtungen*, *Strecken* und *Zenitwinkel*.

4 Versuchsaufbau

4.1 Testfeld

Zur Bestimmung der Kalibrierparameter von polaren Messinstrumenten wurde an der Technischen Universität Berlin ein Testfeld installiert, welches aus 15 ebenen Kalibrierplatten besteht. Diese Kalibrierplatten sind aus handelsüblichen Spanplatten (HMB PF 23, helio-grau, 19 mm) gefertigt und in verschiedenen Bereichen des Testraumes zur vollständigen Abdeckung der Hemisphäre angebracht. Die Kalibrierplatten haben eine Größe von ca. 1,0 m x 1,3 m und die Grundfläche des Testraumes beträgt ca. 60 m² bei einer Höhe des Raumes von 3,2 m.

4.2 Ablauf der Kalibrierung

Der Ablauf der Kalibrierung gliedert sich in verschiedene Bearbeitungsschritte:

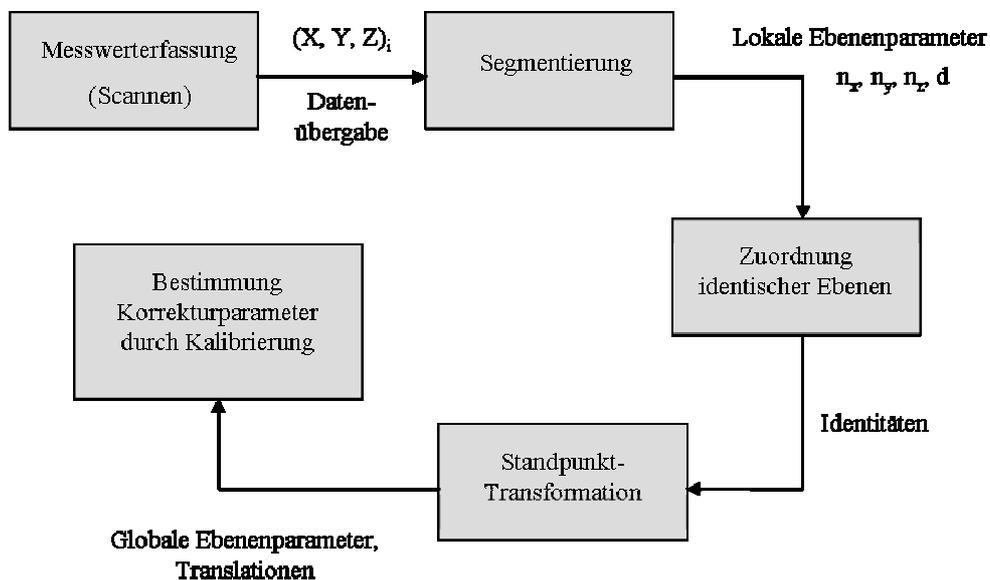


Abb. 3: Überblick über den Ablauf der Kalibrierung

Die Messwernerfassung erfolgt mit dem zu untersuchenden Instrument vor Ort im Testfeld. Aufgrund der baulichen Gegebenheiten ist es jedoch nicht möglich, die Instrumentenstandpunkte frei zu wählen. Durch Simulationen mit synthetischen Daten wurde nachgewiesen, dass durch die Auswahl von vier Standpunkten mit Variationen in der Instrumentenhöhe ein optimaler Kompromiss zwischen Dauer der Messwernerfassung und somit auch der Auswertungszeit und der Genauigkeit der Parameterschätzung erreicht wird.

Nach dem Scannen der Kalibrierplatten und/oder der gesamten Szenerie von unterschiedlichen Standpunkten aus, liegen die originären Beobachtungsdaten eines Scans vor. Dies sind dreidimensionale polare Koordinaten – Horizontalrichtungen, Zenitdistanzen und Schrägstrecken. Das lokale Koordinatensystem des jeweiligen Standpunktes ist hierbei durch die temporäre Position und die Orientierung des Messinstrumentes definiert. Liegen hingegen nur die dreidimensionalen kartesischen Koordinaten der Objektpunkte vor, so muss vor der Auswertung eine Umrechnung in polare Messwerte erfolgen. Die Extraktion der aufgenommenen Ebenen aus den originären Messdaten erfolgt in einem Prozess der Segmentierung mit einer nachgeschalteten Ebenenausgleichung, bei der eventuelle Ausreißer im Beobachtungsmaterial entfernt werden. Dieser Verarbeitungsschritt erfolgt standpunktweise, d.h. als Ergebnis dieses Verarbeitungsschrittes liegen die beschreibenden lokalen Ebenenparameter Normalenvektor $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)^T$ und d als orthogonaler Abstand zum Koordinatenursprung vor.

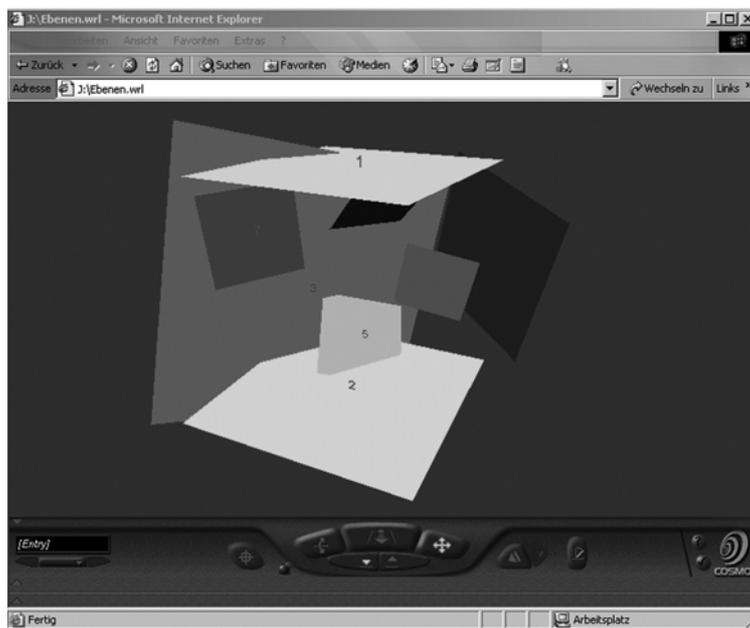


Abb. 4: Darstellung der Ebenen des Kalibrierfeldes mit dem VRML-Plugin *Cosmoplayer* (SGI)

In einem sich daran anschließenden Prozess der Zuordnung von homologen Ebenen werden die Identitäten der Ebenen auf den unterschiedlichen Standpunkten festgestellt. Dieser Schritt kann über eine Auswahl und manuelle Zuordnung der in einem Viewer dargestellten Ebenen erfolgen. Unter Verzicht auf aufwändige Auswerte- und Präsentationssoftware der Scannerhersteller lässt sich die Visualisierung auch in einem VRML-Plugin eines Internetbrowsers durchführen. Eine automatische Zuordnung der Identitäten ist hingegen durch den Einsatz projektiver Geometrie (homogene Koordinaten) und robusten Monte-Carlo-Verfahren, wie z.B. GASAC (RODEHORST 2004) als genetischem Algorithmus, möglich.

Die so gefundenen identischen Ebenen werden in einem nächsten Schritt zur Transformation der lokalen Standpunktsysteme in ein übergeordnetes und/oder gemeinsames Koordinatensystem benutzt. Dabei wird unter Verzicht auf identische Punkte (Passpunkte) eine verkettete Systemtransformation mittels identischer Ebenen durchgeführt, in der beliebig viele lokale Standpunktsysteme simultan in ein übergeordnetes Referenzsystem überführt werden können. Die Orientierungsparameter der verschiedenen Standpunktsysteme (Translationen und Rotationen) gehen nachfolgend als Näherungswerte in die eigentliche Bestimmung der Kalibrierparameter ein.

5 Ergebnisse

Als Referenzprojekt wurde eine Kalibrierung des an der TU Berlin entwickelten Laserscanners durchgeführt. Dieses Messinstrument besitzt aufgrund des konstruktiven Aufbaus (RIETDORF & GIELSDORF 2003) die in Kapitel 2 angesprochenen Instrumentenfehler.



Abb. 5: Prototyp Laserscanner

Ausgleichsstatistik:

Beobachtungen: 6326

Redundanz des Systems: 6251

Instrumentenfehler:

Additionskonstante: $72,6 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$

Kippachsenfehler: $-0,034 \text{ gon} \pm 0,003 \text{ gon}$

Zielachsenfehler: $-0,304 \text{ gon} \pm 0,014 \text{ gon}$

Achsexzentrizitäten

a_x : $-0,4 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$

a_y : $1,1 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$

a_z : nicht signifikant

Die erwarteten Instrumentenfehler sind durch die Kalibrierung bestätigt worden. Die Bestimmung des Maßstabes wurde in diesem Fall nicht vorgenommen, da eine Bestimmung mittels klassischer Techniken (Vergleichsstrecke) eine sicherere Schätzung des Maßstabsfaktors zulässt. Durch die in der Kalibrierung implementierte Varianzkomponentenschätzung ist eine Aussage über die erwartende Genauigkeit des Sensors gegeben (Horizontal- und Vertikalwinkelmessgenauigkeit: $\pm 0,1 \text{ gon}$, Streckenmessgenauigkeit $\pm 1 \text{ mm}$).

6 Ausblick

In diesem Beitrag wurde eine Methode zur Kalibrierung von polaren Messinstrumenten am Beispiel eines Laserscanners vorgestellt. Die Bestimmung von Kalibrierparametern erfolgt dabei in einem aus Ebenen bestehenden dreidimensionalen Kalibrierfeld. Das verwendete Modell erlaubt eine Bestimmung der relevanten Instrumentenfehler in einem Schritt und liefert über eine Varianzkomponentenschätzung auch eine Aussage über die Genauigkeiten der einzelnen Sensorenkomponenten (Winkel- und Streckenmessteil). Zur sicheren Bestimmung des Maßstabes sind im Testfeld noch Erweiterungen vorzunehmen. Eine Ableitung des Maßstabes ist über die hochgenaue Einmessung der Instrumentenstandpunkte (Streckenunterschiede) und eine anschließende 7-Parameter-Transformation möglich.

7 Literaturverzeichnis

BOEHLER, W., BORDAS VICENT, M. & MARBS, A. 2003: Investigation Laser Scanner Accuracy. In: Proc. CIPA 2003 XIXth International Symposium, Antalya (Turkey), 2003, S. 474 – 479

- HORN, B. K. P. 1987: Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. *Journal of Optical Society of America*, Vol. 4, No. 4, April 1987, p. 629 – 642.
- KERN, F. 2003: Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten, Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig, Nr. 19
- INGENSAND, H., RYF, A. & SCHULZ, T. 2003: Performances and experiences in terrestrial laserscanning. In: *Proc. Optical 3D-Measurement Techniques VI*, Zürich,
- RIETDORF, A. & GIELSDORF, F. 2003: Gemeinsame Auswertung von Handaufmass und scannenden Messverfahren. In: Luhmann, T. (Hrsg.): *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik*, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2003, Wichmann Verlag, Heidelberg
- RODEHORST, V. 2004: *Photogrammetrische 3D-Rekonstruktion im Nahbereich durch Auto-Kalibrierung mit projektiver Geometrie*, Wissenschaftlicher Verlag Berlin, Dissertation, Berlin

Digitale Nahbereichsphotogrammetrie zur Objektrekonstruktion der Bremer Hanse Kogge

MANFRED WIGGENHAGEN¹, ADELHEID ELMHORST², ULLA WISSMANN³

Zusammenfassung: In diesem Beitrag wird die dreidimensionale photogrammetrische Objektrekonstruktion der Bremer Hanse Kogge im Schiffahrtsmuseum Bremerhaven mit Methoden der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie beschrieben. Neben der Aufnahmeplanung, Signalisierung der Objektpunkte und -linien, und Durchführung der photogrammetrischen Aufnahme wird auch auf die Besonderheiten der Auswertemethodik mit der verwendeten Auswertesoftware eingegangen.

1 Einleitung

Die Hanse Kogge wurde im Oktober 1962 in der Weser gefunden und von 1982 bis 1999 im heutigen Schiffahrtsmuseum in Bremerhaven vollständig in Konservierungsflüssigkeit eingetaucht (DSM, 2003B; HOFFMANN, 1981). Diese Maßnahme diente der langfristigen Sicherung des hölzernen Schiffsrumpfes. Vor der Konservierung wurde das Schiff 1982 vom Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI) mit der analogen Stereomesskamera SMK 120 aufgenommen. Für den Auftraggeber wurden Strichzeichnungen und Profilpläne im Maßstab 1: 20 aus den Messbildern angefertigt. Nach 17 Jahren in der Konservierungsflüssigkeit wurde das Schiff trockengelegt. Nach Abschluss der Trocknung wurde festgestellt, das sich der Schiffskörper in der Zwischenzeit teilweise um bis zu 25 cm verformt hatte. Daher wurde das IPI im Jahr 2003 erneut mit der photogrammetrischen Erfassung und Rekonstruktion des Objektes beauftragt. Um die vollständige Form der Kogge ermitteln zu können, wurden über 100 Bilder mit den digitalen Kameras Nikon D100 und Rollei D7 metric⁵ aufgenommen. Der Bildverband wurde mit der Auswertesoftware PhotoModeler 5.0 Pro der Firma EOS gerechnet. Um eine stabile Verknüpfung des Verbandes zu erzielen, wurden ca. 105 Verknüpfungspunkte an der Kogge befestigt. Da der Auftraggeber die Profilauswertung aus dem Jahr 1982 als Vergleich heranziehen wollte, wurden die ursprünglichen Profillinien am Schiffskörper signalisiert und ebenfalls dreidimensional erfasst. Als Ergebnis der Auswertung wurden die 10 Profile in analoger Form im Maßstab 1:20 und auch als AutoCAD Datei im DXF-Format an den Auftraggeber abgegeben.

2 Material und Methoden

2.1 Rahmenbedingungen

Die Bremer Hanse Kogge wurde im Schiffahrtsmuseum in Bremerhaven in der Ausstellungshalle mit einer Stahlkonstruktion unter dem Hallendach befestigt. Stählerne Streben und Diagonalelemente halten das hölzerne Schiff zusammen und fixieren es mit der Unterseite auf dem Fußboden (WESKI, 1999; DSM, 2003A, GNT,2003). Die Maximalausdehnung der Kogge beträgt 24 x 8 x 7 m.

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

² Dipl.-Ing. Adelheid Elmhorst, email: elmhorst@ipi.uni-hannover.de,

³ Dipl.-Ing. Ulla Wissmann, email: wissmann@ipi.uni-hannover.de.

Die Position der Kogge im Ausstellungsraum im Erdgeschoss ermöglicht die Festlegung einiger Kamerastationen auf der Empore im 1. Stockwerk. Alle weiteren Kamerastationen befanden sich im Erdgeschoss in einem maximalen Abstand von 7 m. Aufgrund von Sichtbehinderungen durch Wände, Pfeiler und sonstige räumliche Gegebenheiten wurden die meisten Bilder in Aufnahmeabständen von 2.5 bis 6 m aufgenommen.

2.2 Historische Ergebnisse

Die historischen Ergebnisse bestanden sowohl aus detaillierten Strichzeichnungen des Schiffskörpers, als auch aus Profilzeichnungen an zehn verschiedenen Positionen rechtwinklig zur Schiffsachse. Um die Ergebnisse der Profilauswertung aus dem Jahr 1982 mit der aktuellen Messung vergleichen zu können, wurden die Profillinien aus den Originalzeichnungen rekonstruiert und am Schiffskörper mit weißem Band markiert. Zusätzlich wurden ca. 105 kreisförmige Zielmarken auf der Oberfläche befestigt. Diese Punkte wurden später als Verknüpfungspunkte für die Einzelbilder innerhalb der Bündelblockausgleichung genutzt.

2.3 Anwendung digitaler Kameras

Für die photogrammetrische Aufnahme wurden zwei digitale Kameras verwendet. Die 6-Mpixel Kamera Nikon D100 und die metrische 5-Mpixel Kamera Rollei D7 metric⁵ wurden vor dem Einsatz mit einem dreidimensionalen und einem zweidimensionalen Testfeld kalibriert (WIGGENHAGEN, 2002). Die Punktsignalisierung und Bildaufnahme erforderte einen Zeitaufwand von ca. 10 Stunden. Die meiste Zeit wurde für die Punktbelegung und die Wiederherstellung der Profillinien auf der Kogge sowie für den Bilddatentransfer und die

Kamera		Objekt- abstand/ Basislänge	Bild- maßstab	Genauigkeit in x,z,y
Rollei	[mm]			[mm]
Sensor- breite	8.76	6.9 / 1.8	1 : 929	2.8, 2.8, 10.7
Brenn- weite	7.43	2.8 / 1.8	1 : 377	1.1, 1.1, 1.8
Nikon				
Sensor- breite	23.7	6.9 / 1.8	1 : 280	2.2, 2.2, 8.6
Brenn- weite	24.6	2.8 / 1.8	1 : 114	0.9 , 0.9, 1.4

Tab. 1: Erreichbare Punktmessgenauigkeit

Bildkonvertierung von der Speicherkarte zum Notebook benötigt. Bedingt durch die unterschiedlichen Blickwinkel und lokale Sichtbehinderungen mussten in der Ausstellungshalle über 100 Bilder aufgenommen werden. Von der Rollei D7 metric⁵ wurden 60 Bilder und der Nikon D100 wurden 39 Bilder für die spätere photogrammetrische Auswertung verwendet.

Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Sensorgrößen und der maximalen Objektdistanzen und Basislängen wurde die erreichbare Punktmessgenauigkeit abgeschätzt (siehe Tabelle 1).

Die berechnete Punktmessgenauigkeit erfüllte mit 1 bis 11 mm die geforderte Messgenauigkeit von maximal 20 mm in diesem Projekt.

Die Software PhotoModeler 5.0 Pro der Firma Eos Systems Inc. (EOS 2003) wurde für die Bildkoordinatenmessung, Bündelblockausgleichung und die Aufbereitung der Ergebnisse verwendet. Die meisten der Verknüpfungspunkte wurden in 3 und mehr Bildern gemessen (siehe Tabelle 2). Die hohe Redundanz bewirkte einen sehr stabilen Bildverband und eine zuverlässige Punktbestimmung innerhalb der Bündelblockausgleichung.

Nachdem alle Bilder orientiert worden waren, konnten die signalisierten Profile erfolgreich gemessen werden. Die dreidimensionale Punktwolke wurde im 3D-Viewer der Software angezeigt und überprüft. Punkte mit schlechter oder schwacher Geometrie wurden durch zusätzliche Messungen gestützt. Die meisten der Profilpunkte konnten in drei und mehr Bildern gemessen werden.

Punkttyp	Anzahl	
	Punkte	Strahlen pro Punkt
Verknüpfungspunkt	4	< 3
	12	3
	200	≥ 4
Summe	216	
Profilpunkt	27	< 3
	213	3
	107	≥ 4
Summe	347	

Tab. 2: Bildstrahlen pro Messpunkt

3 Ergebnisse

Um die aktuellen Ergebnisse mit den Vermessungen aus dem Jahr 1982 vergleichen zu können, wurden die Profile erneut im Maßstab 1 : 20 ausgedruckt.

3.1 Koordinaten

Die photogrammetrische Auswertung lieferte dreidimensionale Koordinaten der 216 Verknüpfungspunkte mit einer Genauigkeit von +/- 0.5 mm. Die hohe Genauigkeit basiert auf der Tatsache, dass die kreisförmigen Zielmarken mit einem automatischen Punktmessoperator im digitalen Bild gemessen wurden, der das Zentrum der abgebildeten Ellipse mit einer Genauigkeit von etwa +/- 0.1 pix im Bild messen kann. Die Profilpunkte wurden manuell gemessen. Da die Messung monoskopisch in konvergenten Bildern durchgeführt wurde, war die Lokalisierung identischer Punkte in manchen Fällen vergleichsweise schwieriger als bei stereoskopischer Auswertung. In diesen Fällen erwies sich die Möglichkeit zur Einblendung von Epipolarlinien als sehr hilfreich. Die Punktgenauigkeit im Objektraum wurde für diese 347 Punkte mit +/- 3 mm in allen drei Koordinatenrichtungen berechnet.

3.2 Linien

In Ergänzung zur photogrammetrischen Aufnahme wurden zehn Kontrollstrecken eingemessen. Die Anfangs- und Endpunkte dieser Strecken wurden signalisiert und in den digitalen Bildern gemessen. Innerhalb der Bündelblockausgleichung wurden diese Strecken als unabhängige Referenzstrecken definiert. Für die nachfolgende Ergebnisdokumentation wurden die verschiedenartigen Linien in unterschiedlichen Layern und Farben abgespeichert. Für die Darstellung der Profillinien wurden die berechneten Profilpunkte zusätzlich durch Linien verbunden. Ein Vergleich zwischen der Messung aus dem Jahr 1982 und 2003 für das Profil 9 ist in Abbildung 1 dargestellt.

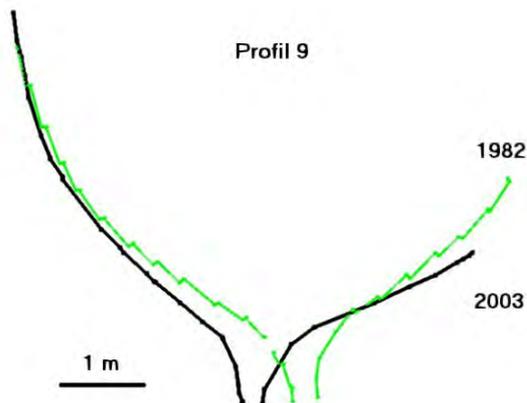


Abb. 1: Verformungen im Profil 9

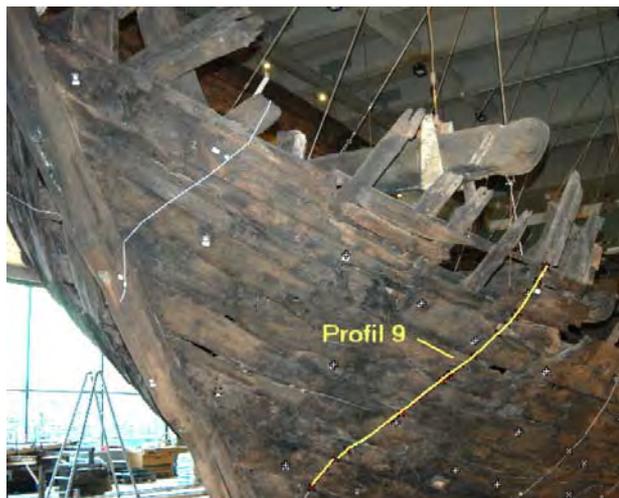


Abb. 2: Oberfläche mit markierter Profilhälfte

Zur Verdeutlichung wurde in einem der digitalen Bilder die Lage der rechten Hälfte des Profiles 9 hervorgehoben (siehe Abb. 2). Zwischen dem Hallendach und der Kogge sind die unterschiedlichen Befestigungselemente aus Stahl erkennbar, die es dem Konservator und Holztechniker ermöglichten, das Schiff im Raum zu fixieren und die Form des Holzurumpfes festzulegen.

Die Deformationen der Kogge sind auf unterschiedliche Einflüsse zurückzuführen. Einige lokale Verformungen wurden durch die unterschiedliche Längenausdehnung der hölzernen Konstruktionselemente bewirkt. Während das Schiff in den Jahren 1982 bis 1999 in Konservierungsflüssigkeit eingelegt war, dehnten sich einzelne Planken stärker aus als die benachbarten Spanten. Zwischen einzelnen horizontalen Ebenen und Oberflächenteilen wurden später Differenzen bis zu 20 cm entdeckt.

Eine der größeren Verformungen des Schiffes entstand, als man versucht hatte, mit zusätzlichen stählernen Verstrebungen innerhalb des Bootskörpers einige der lokalen Deformationen zu kompensieren. Da die Aufhängungen diagonal von der Decke der Museumshalle aus wirkten, bewegte sich daraufhin die Kogge mit dem Kiel zu einer Seite und rollte zusätzlich geringfügig in einer Richtung. Diese Effekte sind durch die erneute photogrammetrische

Rekonstruktion der dreidimensionalen Form der Kogge nachgewiesen worden. Im Vergleich der ausgedruckten Profile aus den Jahren 1982 und 2003 sind die unterschiedlichen Veränderungen des Schiffskörpers erkennbar (siehe Abb. 3).

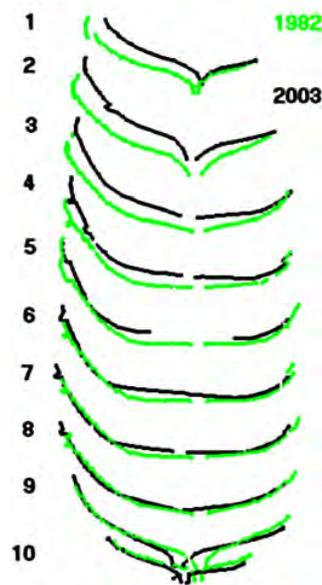


Abb. 3: Vergleich der Profile

3.3 Oberflächen

Zu Dokumentationszwecken wurde die Photoinformation aus mehreren digitalen Bildern als

Material für die Darstellung eines texturierten Oberflächenmodells genutzt. Die Zuweisung der Bildinformation aus unterschiedlichen Blickrichtungen erfolgte über 46 Farbbilder der Nikon D100.

Ein Teil der linken Schiffsseite wurde als dreidimensionales Oberflächenmodell mit der Auswertesoftware berechnet und dargestellt. Ein dreidimensionaler Eindruck des Ergebnisses ist auch im Internet zu betrachten, wenn der Internet Browser über ein geeignetes plug-in zur Darstellung von VRML-Dateien verfügt. Es wurden z.B. die frei erhältlichen Viewer: Cortona oder Cosmo Player eingesetzt.

Abbildung 4 zeigt die linke Seite der Kogge mit Profilen, Verknüpfungspunkten und Phototexturen im vorderen Teil des Schiffes.

Die Oberflächendefinition wurde durch Dreiecksvermaschung über die gemessenen Profil- und Verknüpfungspunkte erreicht.

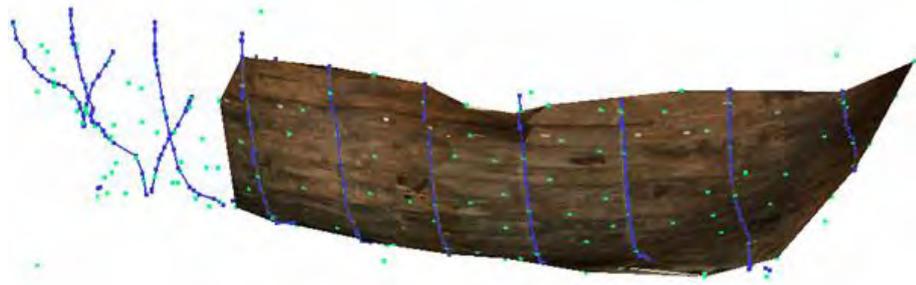


Abb. 4: Texturiertes Teilmodell

3.4 Qualitätskontrolle

Um eine Qualitätskontrolle der berechneten dreidimensionalen Punktwolke zu ermöglichen, wurden mehrere Kontrollstrecken im Messvolumen signalisiert und eingemessen. Zehn Kontrollstrecken mit Streckenlängen von 1.6 bis 6.0 m wurden gemessen und mit den berechneten Strecken aus der photogrammetrischen Bündelgleichung verglichen. In Tabelle 3 werden die Ergebnisse zusammengefasst.

Da die Kontrollstrecken mit einem herkömmlichen Stahlmessband gemessen wurden, wird für sie nur eine Genauigkeit von +/- 5 mm angesetzt.

Aufgrund ungünstiger Sichtbedingungen und schlechter Schnittwinkel konnten einige der Kontrollstrecken nur mit geringer Genauigkeit bestimmt werden. Die mittlere absolute Längendifferenz von 13.4 mm erfüllte jedoch die gestellten Anforderungen in diesem Projekt.

	Kontrollstrecke	[m]	
		Länge	Differenz
1	1208-518	3.590	-0.010
2	1207-528	3.910	-0.020
3	1206-526	3.550	-0.029
4	223-225	6.048	-0.014
5	801-802	2.800	-0.016
6	285-296	3.760	-0.012
7	083-073	2.020	0.011
8	415-053	3.470	0.013
9	445-311	1.590	0
10	310-017	2.201	0.009

Tab. 3: Berechnete Längenabweichungen

4 Diskussion

3.1 Vergleich Analogauswertung mit Digitaltechnik

Im Vergleich zu der historischen analogen Bildaufnahme erforderte die digitale Messung eine Unzahl an zusätzlichen digitalen Bildern. Dies ist begründet in der geringeren Auflösung der digitalen Kameras und den ungünstigen Sichtbedingungen in der Ausstellungshalle.

Im Jahr 1982 wurden vierzig Stereobildpaare für die Herstellung der Strichzeichnungen der Kogge benötigt. Für die Berechnung der Profile wurden lediglich zehn vertikale Lotlinien von beiden Seiten auf den Schiffskörper projiziert und aufgenommen (siehe Abb.5). Diese Linien wurden am Stereoplanigraph C8 gemessen und in Echtzeit auf einem mechanischen Zeichentisch ausgegeben.

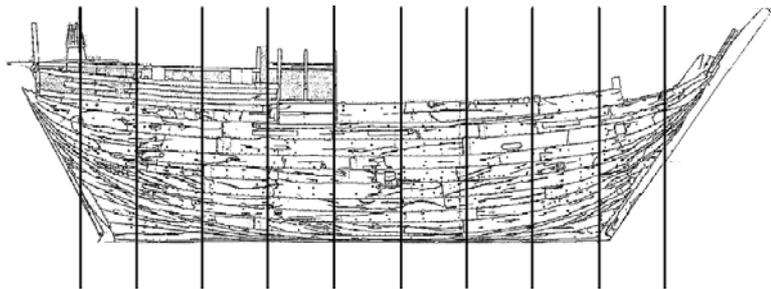


Abb. 5: Strichzeichnung mit Lotlinien

In der zweiten Messkampagne im Jahr 2003 wurden über 90 Bilder für die photogrammetrische Bündeltriangulation genutzt. 227 Verknüpfungspunkte und zwanzig signalisierte Profillinien waren notwendig, um genügend identische Punkte in den konvergenten Bildern für die monoskopische Bildauswertung vorzufinden. Die Profile werden aus etwa 340 zusätzlich gemessenen Punkten gebildet. Die Bildkoordinaten dieser Punkte wurden manuell mit der graphischen Maus am Computer gemessen.

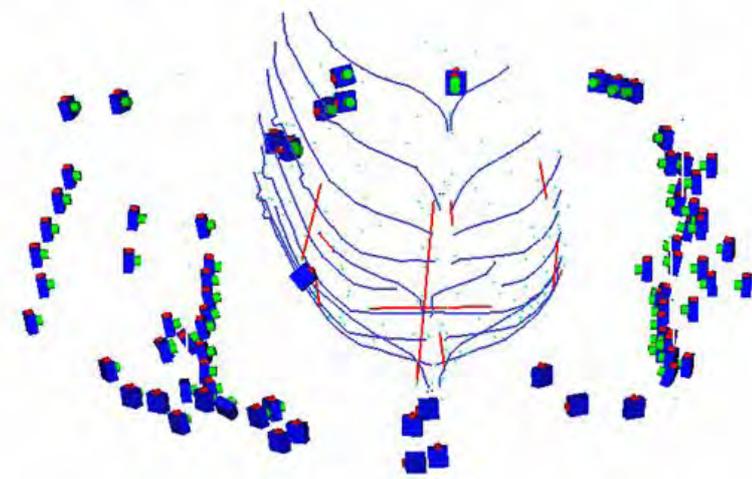


Abb. 6: Aufnahmesituation

Abbildung 6 zeigt eine Übersicht der Kamerastandorte, der Profillinien, Kontrollstrecken und Verknüpfungspunkte.

Die gesamte Bildpunktmessung, Bildorientierung und Objektrekonstruktion wurde mit einem Standardcomputer ohne zusätzliche digitale Stereoarbeitsstation durchgeführt.

Die geforderte Genauigkeit von maximal 20 mm im Objektraum konnte in allen Fällen eingehalten werden.

Die eingesetzte Software PhotoModeler 5.0 Pro. der Firma Eos Systems Inc. bot für die Auswertung u.a. folgende Funktionen an:

- Kamerakalibrierung
- Projektverwaltung
- Manuelle und automatische Punktmessung
- Epipolarlinienunterstützung
- Definition von Punkten, Linien, Oberflächen und Texturen
- Photogrammetrische Bündelblockausgleichung
- Messung dreidimensionaler Koordinaten und Strecken
- Visualisierung dreidimensionaler Ergebnisse
- Orthobildberechnung
- Vektor- und Rasterdatenexport.

Mit Hilfe der statistischen Berichte und Darstellungen der Restklaffungen konnten Messfehler sehr gut erkannt und eliminiert werden. Die Möglichkeit mehrere Projektkameras in einem gemeinsamen Bildverband zu berücksichtigen, war sehr wichtig für die gleichzeitige Nutzung beider eingesetzten Kameras in einem gemeinsamen Projekt.

4.2 Analoge Ergebnisse im Vergleich zu digitalen Resultaten

1982 wurden Strichzeichnungen und Profildarstellungen im Maßstab 1 : 20 hergestellt. Die Strichzeichnungen wurden für beide Seiten und den Innenraum der Kogge mit hohem Auswerteaufwand hergestellt. Der Detaillierungsgrad der Strichzeichnungen war von der Erfahrung des Auswerters abhängig und stellte als Interpretationsergebnis der Bilder alle wichtigen Objektteile dar. Da dieses Verfahren äußerst zeit- und kostenintensiv war, werden heute stattdessen bevorzugt Orthobildmosaiken angefertigt.

Aus Kostengründen wurden 2003 keine detaillierten Strichzeichnungen vom Auftraggeber gefordert. Es wurden nur Analogausgaben der zehn Profile und die digitalen Ergebnisdaten verlangt. Die Ergebnisse wurden in Standardformaten, wie z.B. DXF und VRML exportiert, um mit externen Anwendungen wie z.B. AUTOCAD weiterverarbeitet werden zu können.

5 Zusammenfassung

In diesem Projekt konnte nachgewiesen werden, dass moderne digitale Kameras geeignet sind, um die Objektrekonstruktion eines großen Objektes in vertretbarer Zeit durchführen zu können. Die Bremer Hanse Kogge wurde mit über 100 digitalen Bildern aufgenommen. Hierzu wurden die digitalen Kameras Rollei D7 metric⁵ und Nikon D100 eingesetzt. Die gewünschte Genauigkeit von maximal 20 mm im Objektraum konnte eingehalten werden. Die erreichte Punktgenauigkeit am Objekt wurde über zehn unabhängig gemessenen Kontrollstrecken berechnet. Die mittlere Längenmessabweichung betrug 13.4 mm. Mit den erneut gemessenen Profilen konnte die Verformung der Kogge nachgewiesen werden. Schnitte durch den Schiffskörper wurden als Profile dargestellt und im Maßstab 1 : 20 ausgegeben.

6 Danksagung

Das Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI) der Universität Hannover dankt der Firma Rolleimetric GmbH, Braunschweig für die Möglichkeit das Projekt mit ihrer digitale metrischen Kamera Rollei D7 metric⁵ durchzuführen. Die Kamera hat sich als sehr stabil erwiesen, die radiometrische Qualität der Bilder war bemerkenswert hoch und die Anwendung der Kamera im Praxiseinsatz wurde als unkompliziert eingestuft.

7 Literaturverzeichnis

- DSM, 2003A. „Die Bremer Hanse Kogge von 1380 im DSM, Archäologische Sensation und Ausgangspunkt erfolgreicher Forschung“. <http://www.dsm.de/Kogge/kogge.htm> (Zugriff am: 6. 9.2003)
- DSM, 2003B. „Mittelalterliche Schifffahrt. Die Konservierung der Mittelalter-Flotte“. <http://www.dsm.de/MA/konserve.htm> (Zugriff am: 6.9.2003)
- Eos, 2003. PHOTOMODELER 5, USER MANUAL, EOS SYSTEMS INC., pp. 211-230.
- GNT, 2003. „Hansekogge wird im Mai freigegeben“ <http://www.gnt-verlag.de/programm/42/info-dk000211.shtml> (Zugriff am: 6. 9.2003)
- HOFFMAN, P., 1981, Towards the Conservation of the Bremen Hanse Cog. *Mariner's Mirror*, 67.4: pp.372-373.
- WESKI, T., 1999. Fiktion oder Realität? – Anmerkungen zum archäologischen Nachweis spätmittelalterlicher Schiffsbezeichnungen. *SKYLLIS*, Zeitschrift für Unterwasserarchäologie (2)2, pp.96-106.
- Wiggenhagen, M., 2002. CALIBRATION OF DIGITAL CONSUMER CAMERAS FOR PHOTOGRAMMETRIC APPLICATIONS, *THE INTERNATIONAL ARCHIVES OF THE PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES*, COM.III, GRAZ, AUSTRIA, VOL. XXXIV, 2002, PART 3B, pp. 301-304.

Das Strukturmuster des Harzes, ermittelt aus Satellitendaten und digitalen Geländemodellen

¹HANS JOACHIM FRANZKE, ²CHRISTIAN FISCHER,
³RAINER MÜLLER und ⁴HANS-ULRICH WETZEL

Zusammenfassung: Der Harz ist als Hochscholle ein geologisch junges Gebilde von ca. 85-90 Ma. Er wird an seinem Nordrand von einer jungen Bruchstufe begrenzt, an der in diesem Zeitraum die Harzscholle um ca. 5 km gehoben und das Vorland um ca. 2 km abgesenkt wurde. Durch die Auswertung von Geländestufen mit Hilfe von verschiedenen beleuchteten Digitalen Geländemodellen und den Vergleich mit geologischen Strukturkarten und Lineations - Interpretationen an Satellitendaten konnte eine große Anzahl von linearen Bildelementen kartiert werden. Sie bestätigen das bekannte Bruchmuster und ermöglichen es darüber hinaus, regionale Verknüpfungen der Bruchzonen herzustellen. Der Vergleich der DGM-Ergebnisse mit Satelliten gestützten Interpretationen zeigte, dass unter den vorliegenden Geländebedingungen (Bodendecke, Vegetation) die visuelle Interpretation von Satellitenaufnahmen im wesentlichen ebenfalls eine morphologische Kartierung darstellt, die der Auswertung von DGM nicht überlegen ist.

1 Einführung

Der Harz als Mittelgebirge ist ein geologisch sehr junges Blocksegment des mitteleuropäischen Schollenfeldes. Er hat sich entlang der Harznordrandstörung in mehreren Hebungsphasen seit der Oberkreide (ca. 85 Ma), zuletzt nochmals intensiv seit dem Miozän (seit ca. 15 Ma), um bis zu 5 km gegenüber seinem Vorland gehoben, wobei sich das Vorland gleichzeitig in der vorgelagerten Subherzynen Senke um bis zu 2 km Tiefe abgesenkt hat. Durch die gleichzeitig mit der Hebung einsetzende Erosion sind die mesozoischen Deckschichten auf dem Harzblock vollständig abgetragen, so dass dort der gefaltete variszische Unterbau (Schichten des Ordoviziums bis zum Unterkarbon) an der Oberfläche ansteht. Da Hebung und Erosion fast im Gleichgewicht standen, ist der Harz trotz der additiv ca. 7 km betragenden Vertikalbewegungen an der Nordrandstörung nicht über den Status eines Mittelgebirges hinausgekommen und erreicht heute zu seinem Umland eine maximale Höhendifferenz von knapp 1000 m im Brockengebiet. Unter Einbeziehung des Umlandes, in dem die mesozoischen Schichten des ungefalteten Deckgebirges (Zechstein bis Oberkreide) noch erhalten sind, besteht in der Harzregion die Möglichkeit, die Entwicklung von Bruchstrukturen über eine Zeitspanne von ca. 350 Ma zu verfolgen (Abb. 1).

¹Dr. Hans Joachim Franzke, TU Clausthal, Institut für Geologie und Paläontologie, Leibnizstraße 10, D-38678 Clausthal-Zellerfeld, email: hans.joachim.franzke@tu-clausthal.de,

²Dr.-Ing. Christian Fischer, TU Clausthal, Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, Erzstr. 18, D-38678 Clausthal-Zellerfeld, email: christian.fischer@tu-clausthal.de,

³Dr. Rainer Müller, TU Clausthal, Institut für Geologie und Paläontologie, Leibnizstraße 10, D-38678 Clausthal-Zellerfeld, email: rainer.mueller@tu-clausthal.de,

⁴Dr. Hans-Ulrich Wetzel, Geoforschungszentrum Potsdam, Department 1, Sektion 1.4, Telegrafenberg A17, D-14473 Potsdam, email: wetz@gfz-potsdam.de.

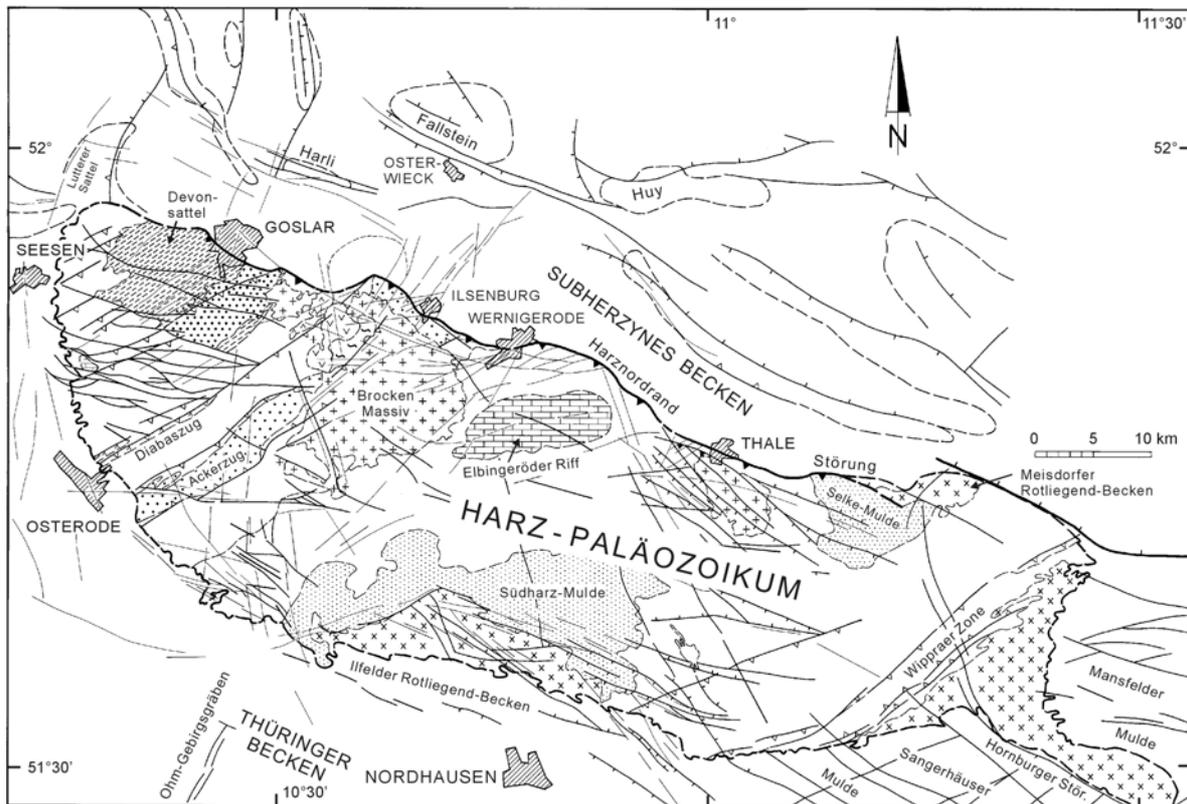


Abb. 1: Strukturkarte des Harzgebietes, kompiliert auf der Grundlage publizierter geologischer Übersichtskarten. Dicke Strichsymbole –Störungen nach geologischen Karten, Zähnelung zeigt in Richtung der relativ abgesenkten Scholle. Striche mit Dreieck –variszische Störungen (SW-NE). Dünne Striche –Hauptlineationen nach Interpretation von TM-Aufnahmen durch die Autoren.

2 Methodik und Daten

Für die durchgeführten Arbeiten standen unterschiedliche Datensätze zur Verfügung. Als wichtigste Datengrundlage konnte ein digitales Geländemodell (DGM) des gesamten Harzes genutzt werden, welches vom Landesamt für Vermessung und Geoinformation des Bundeslandes Sachsen-Anhalt zur Verfügung gestellt wurde. Aus diesem Datensatz wurde ein DGM mit einer einheitlichen Rasterweite von 50 m generiert. Durch Angabe unterschiedlicher Beleuchtungsrichtungen sowie unterschiedlicher Überhöhungsfaktoren wurden so genannte Schattenschummerungen hergestellt, die aufgrund der Schatteneffekte visuell eine plastische Wiedergabe des Geländes ermöglichten. Insgesamt wurden Auswertungen mit einem Azimut der –virtuellen- Sonneneinstrahlung von 20° (NNW), 45° (NE), 145° (SE) und 280° (ESE) vorgenommen. Der angenommene Sonnenstand betrug jeweils 45°. Mit diesen Hilfsmitteln wurden morphologische Geländemerkmale, insbesondere Reliefkanten, linear gestreckte Einsenkungen und auch positive Reliefformen im Maßstab 1:100.000, entweder direkt am Bildschirm oder anhand einer ausgedruckten Karte ausgewertet. Die Auswertung von plateauartigen Reliefformen, die auf Verebnungsflächen der tertiären Vorgeschichte und auf Schotterterrassen des Quartärs zu beziehen sind, sind hier ausgeklammert und sollen in einer gesonderten Analyse untersucht werden, da sie vor allem neotektonische Schlüsse zulassen. In dieser Phase wird zunächst die allgemeine Bruchverteilung des Gebietes untersucht und mit der variszischen und der jungmesozoisch-känozoischen Tektonik in Beziehung gebracht. Dies soll einen Beitrag zur Bestandsaufnahme der Bruchverteilung liefern.

Für ergänzende thematische Auswertungen wurden neben einer Nutzung von Luftbilddaten, die insbesondere die Teile der Harznordrandstörung abdeckten, auch eine LANDSAT-TM-Szene aus dem Jahre 1989 und Ausschnitte einer IRS-1C-Szene aus dem Jahre 1997 verwendet. Aus diesen Datensätzen wurden Informationen zur Landbedeckung und Landnutzung abgeleitet.

3 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

3.1 Lineationskartierung

Durch die Generierung von Digitalen Geländemodellen mit Beleuchtung aus NNE (20°), NE (45°), SE (145°) und aus WNW (280°) konnten alle im Gebiet auftretenden Bruchrichtungen erfasst werden, soweit sie sich im Relief manifestieren. Als Beispiel ist das DGM mit Beleuchtungsrichtung aus NNE (20°) dargestellt (Abb. 2).

Es sind deutliche Unterschiede sowohl in der Lineationsdichte als auch nach den dominierenden Lineationsrichtungen zwischen der Harzscholle und den Vorländern festzustellen. In der Harzscholle hat die variszische Tektonik und Metamorphose eine Versprödung der Gesteine hervorgerufen, die mit der Intrusion der Granitplutone (295 Ma) abgeschlossen wurde und im Zusammenhang mit der längeren geologischen Geschichte eine dichtere Bruchzerteilung des Harzvariszikums im Vergleich zum Vorland bedingte. Da die lithostratigraphischen Einheiten in SW-NE-Richtung verlaufen und in dieser Richtung verschuppt und z. T. auch verfaltet sind, dominieren SW-NE verlaufende Reliefformen innerhalb des Harzes. Hinzu treten Formen, die im Deckgebirge der Vorländer dominant sind (NW-SE, SSW-NNE, N-S, E-W). Sie müssen später, d. h. im Mesozoikum entstanden oder reaktiviert worden sein, da sie das Deckgebirge bis hinauf zu den Sedimenten der Kreide des Subherzynen Beckens durchtrennen und auch innerhalb des Harzes auftreten.

Auf der Harzscholle treten SW-NE-Lineationen in großer Zahl auf, die aber zumeist nur über kurze Entfernungen zu kartieren sind. Sie prägen sich im Relief relativ schwach aus, da sie zum größten Teil nach dem Variszikum nicht mehr reaktiviert wurden und nur dort Reliefkanten bilden, wo an ihnen Gesteinsgrenzen mit unterschiedlicher Erosionsresistenz austreichen. In einigen Bereichen bedingen sie jedoch das Verspringen der vor allem seit dem Jungmesozoikum aktiven Harznordrandstörung (HNST), so dass diese „Spornbildung“ nur durch die Mitwirkung von reaktivierten SW-NE-Strukturen des Variszikums erklärt werden kann. Die NW-SE gestreckte Harzscholle lässt sich durch diese SW-NE-Fugen in sechs Blocksegmente aufgliedern. Diese zeigen von der zentralen und am stärksten noch im Quartär gehobenen Teilscholle im Bereich des Brockenmassivs (JORDAN 1995) eine Abtreppung nach NW und SE. Diese Abtreppung setzt sich auch über die heutigen NW- und SE-Ränder des Harzes hinaus fort und kann als ein stufenhaftes Absinken der Teilblöcke an SSW-NNE bis SW-NE-Abschiebungsstaffeln charakterisiert werden (vgl. Abb. 3). Das ist aus den publizierten geologischen Karten des Harzes nicht erkennbar.

Ferner sind linear gestreckte Reliefkanten auffällig, die vor allem um NW-SE verlaufen und größere Bereiche des Harzblockes zertrennen und mesozoische oder mesozoisch aktivierte Brüche anzeigen, denen die Hydrothermalgänge des Harzes folgen. Diese sind z. T. aber weitgehend maskiert, da die Störungen durch die Gangfüllung wieder verheilt sind und sich im Relief nicht ausprägen. Das gilt auch für den Bereich der Mittelharzer Vulkanitgänge (Unterperm), die in einem bis 15 km breiten Geländestreifen von Wernigerode nach Nordhausen den Harz in N-S-Richtung als Gangschwarm durchlaufen und wegen der Bruchfüll-

lung mit Gangvulkaniten sich aus dem paläozoischen Umfeld des Schiefergebirges nur sehr wenig herausheben.

Im Bereich der HNST verläuft die dominierende Lineationsgruppierung der um NW-SE streichenden Richtungsgruppe. Durch den Einbau von offenbar reaktivierten SW-NE-Scherzonen des Variszikums entstand eine gewundene, bis zu ca. 3 km breite Störungszone, deren Detailbau von der Lineationsführung detailliert nachgezeichnet wird, da sich hier die jungmesozoisch-känozoische Tektonik am Nordrand der Harzscholle manifestiert. Nach struktur-geologischen Untersuchungen erfolgten bis in das Santon (Oberkreide) vor allem vertikale Verschiebungen an dieser regional bedeutsamen Schollenkante, die im Campan (jüngste erhaltene Oberkreide) zu einengender Verformung (Auf- und Überschiebungen) transformiert wurden (spätkretazische Inversion). Die Überschiebungsbahnen am Harznordrand geben sich durch den stärker geschwungenen Verlauf der Lineationen in der Nordrandzone zu erkennen.

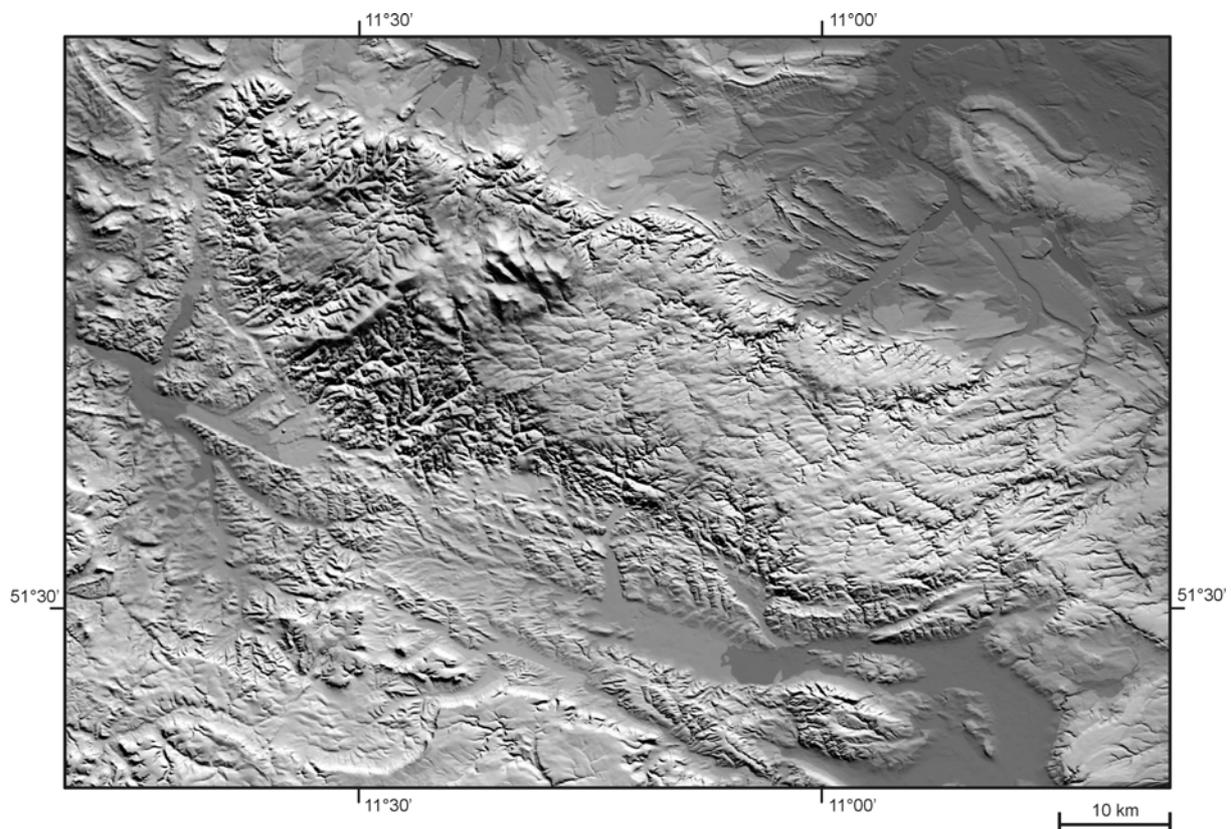


Abb. 2: Digitales Geländemodell des Harzgebietes, abgeleitet aus topographischen Karten der Landesvermessungsämter der Bundesrepublik Deutschland. Rasterweite 50 m, Überhöhung 2,5. Für diese Abbildung wurde eine Beleuchtung aus NNE (20°) generiert. Hierdurch werden WSW-ENE bis NW-SE verlaufende Reliefkanten herausgehoben.

In den Harzvorländern ist die Bruchdichte/Lineationsdichte wesentlich geringer, da die Gesteine des Deckgebirges die variszische Prägung nicht erlebt haben, also durch weniger Verformungsereignisse geprägt sind. Durch die verbreiteten Einlagerungen von Salinar- und Pelitfolgen im mesozoischen Schichtstapel wird außerdem ein Teil der Verformung duktil, d. h. bruchlos abgefangen, so dass eine geringere Bruchzerteilung des Deckgebirges plausibel ist. Dennoch zeigen alle vier DGM-Darstellungen sehr deutlich, dass die NW-SE-Lineationen über große Strecken, z. T. über den gesamten abgebildeten Bereich, das sind ca. 90 km, verfolgt werden können.

Es sind dies die HNST und zwei markante Lineationen im Südhartzvorland, die die westlichen Fortsetzungen der Kyffhäuser Störung bis zum Roten Berg am SW-Harz und der Finne-Störung markieren. Diese ist bis zur Südflanke des Roten Berges in Reliefdepression zu erkennen. Durch die Verschneidung mit SSW-NNE-Lineationen am Westrand des Harzes ergibt sich eine fast rechtwinklige Blockbegrenzung der Harzscholle SW von Osterode. Bis zur nördlichen Randfuge des Roten Berges reicht die ungestörte, flach nach Süd bis SSW eintauchende Schichttafel des Zechsteins (Oberperm), so dass die Harzscholle am Nordrand des Roten Berges endet.

SSW-NNE-Reliefformen sind im Vorland sehr junge Strukturelemente der tertiären Rifttektonik der Hessischen Senke und treten im Bereich der Eichsfeldschwelle aus dem Thüringer Becken in den Harz ein, werden aber im Harzblock allmählich nach NE abgelenkt. Dieses Umlenken ist auch am Westharzrand und am SE-Rand der Harzscholle in der Fortsetzung der Gera-Unstrut-Zone festzustellen. Die andere Orientierung (SW-NE) der Anisotropien im Unterbau erzwingt offenbar eine Schienung der Bruchrichtungen.

Am Westrand des Harzes zeigt das Strukturmuster eine SSW-NNE-Ausrichtung, die als Ausdruck einer nach Westen einsinkenden Abschiebungstreppe zu sehen ist, an der der flach dem Paläozoikum auflagernde Zechstein stufenweise immer tiefer nach Westen abgesenkt wird.

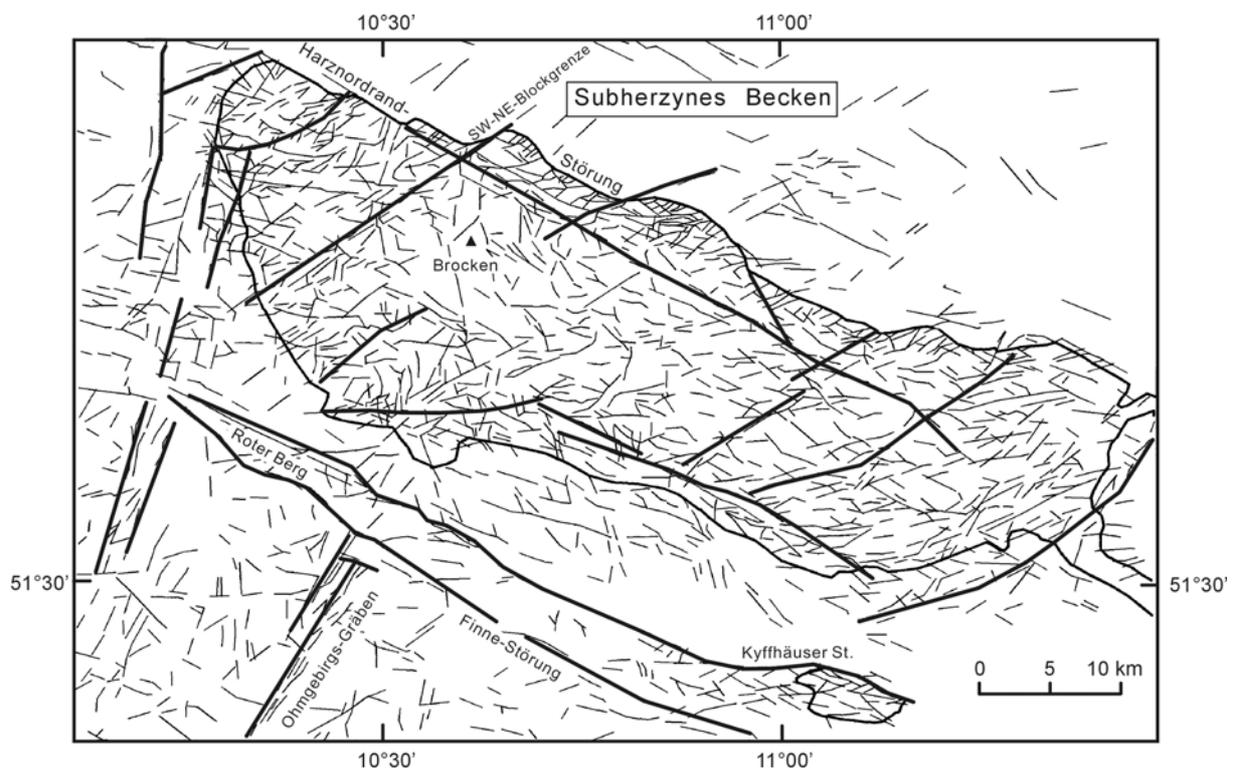


Abb. 3: Zusammengefasste Kartierung der Reliefkanten des in vier Richtungen beleuchteten Digitalen Geländemodells. HNST-Harznordrandstörung. Weitere Erläuterung im Text.

Im südlichen Teil des dem Harzblock im Norden vorgelagerten Subherzynes Beckens ist eine bis zu 2 km mächtige Füllung von Sedimenten der Oberkreide abgelagert worden, deren jüngste Teile (Ilsenburg- und Blankenburg-Schichten/Campan) nur eine geringe Diagenese erlebt haben. Durch die daraus resultierenden rheologischen Eigenschaften sind diese Gesteine bruchtektonisch kaum überprägt. Nur die Härtlingsbereiche der oberkretazischen Sandsteine, insbesondere die intensiv silifizierten Sandsteine der Teufelsmauer zwischen Blan-

kenburg und Ballenstedt, lassen kurz aushaltende Lineationszonen erkennen. Diese markieren streichende Störungen an der Südflanke des Quedlinburger Sattels, des Harli und des Huy oder bilden die Klüftung dieser Härtinge ab. Strukturen des Harzes und der HNST, vor allem die SW-NE-Begrenzungen der Sporne, pausen sich bis in die Oberkreide des Subherzynen Beckens durch und belegen ihre junge Aktivierung (Oberkreide und jünger).

3.2 Vergleich mit bisherigen Kartierungen

Bruchinterpretationen von Satellitendaten des Harzgebietes liegen u. a. von MOHR et al. (1977) und von FRANZKE & BANKWITZ (1992) vor. Durch die Einbeziehung von Digitalen Geländemodellen in die Interpretation von Fernerkundungsdaten kann eine Verifizierung und Erweiterung der von diesen Autoren vorgelegten Strukturkarten erzielt werden. Vergleiche beider Ansätze zeigen, dass Satelliteninterpretationen unter humiden Klimabedingungen im Wesentlichen nur Reliefkartierungen sind, da die spektralen Signaturen der unter der Vegetations- und Bodendecke anstehenden Gesteine nicht oder nur punktuell erfasst werden können.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Es kann herausgestellt werden, dass die Auswertung eines homogenen, den Harz und sein Umland umfassenden DGM, unter Nutzung von Schummerungstechniken, einen deutlichen Vorteil gegenüber Einzelauswertungen im vergleichbaren Maßstab bietet. Insbesondere ermöglichte die Gesamtdarstellung eine Überprüfung der erfassten Lineamente hinsichtlich ihrer tektonischen Einordnung. Der Vergleich mit Satelliteninterpretationen zeigte, dass das Strukturmuster mit der angewendeten DGM-Interpretation sogar vollständiger erfasst werden kann. Eine Kombination von DGM mit Satellitenbild ist in einem weiteren Arbeitsgang geplant. Eine weitergehende Überprüfung und Detaillierung der bisherigen Auswertungen ist ferner durch eine Nutzung von SAR-Daten in der nahen Zukunft vorgesehen.

5 Literaturverzeichnis

- FRANZKE, H. J., BANKWITZ, P. & BANKWITZ, E., 1992: Die Bruchtektonik des Harzes und seines Vorlandes nach Satellitenfotos. - Z. geol. Wiss., **20**(3): 209-218; Berlin.
- JORDAN, H., 1995: Quartäre Tektonik und Gipskarst am Südharz, Niedersachsen. - Beiträge zur Geologie von Thüringen, Neue Folge, **2**, 1995: 75-96; Schleusingen.
- MOHR, K., KRONBERG, P. & GÜNTHER, R., 1977: Die Bruchtektonik des Harzes im Satellitenbild. - Geotekt. Forsch., **53**: 68-82; Stuttgart.

Bewertung von Landsat-ETM+- und ASTER-Daten im Hinblick auf ihre geologische Aussagekraft am Beispiel des intrakratonen Amadeus Basins, Finke Gorge National Park (Australien)

CHRISTOPH GLOTZBACH¹ & TORSTEN PRINZ²

Zusammenfassung: Die lithologische Kartierung stellt eine der grundlegenden Arbeitsschritte jedweder geologischer Untersuchungen dar. Unterstützend zur Geländearbeit in ariden Regionen der Erde lassen sich mit Hilfe geeigneter Fernerkundungsdaten großflächige Areale bereits im Vorfeld kleinmaßstäblich kartieren. Von besonderem Interesse sind in diesem Zusammenhang multispektrale Satellitenbilder, wie die seit 1999 erhältlichen ASTER-Daten (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) und Landsat-ETM+-Daten (Enhanced Thematic Mapper Plus). Der technische Vergleich der beiden Satellitensysteme zeigt einen Vorteil des ASTER-Instruments mit einer exakteren spektralen und räumlichen Auflösung. Am Beispiel eines ausgewählten tektonischen Deformationsbereichs innerhalb des intrakratonen Amadeus Beckens in Zentralaustralien wurde untersucht, inwieweit die unterschiedlichen spektralen Informationen der ausgewerteten digitalen Satellitenbilder eine Möglichkeit der Ableitung einer lithostratigraphischen Zuordnung gewährleisten. Im Vordergrund der Analyse standen insbesondere die zielgerichtete Kombination aus gewählter spektraler Bandbreite und nutzbarer geometrischer Auflösung, sowie die Überprüfung ihrer geologischen Information im Gelände. Hierzu wurden mineralspezifische Ratios, Hauptkomponenten und OIF (Optimum Index Faktor) berechnet, und in möglichst aussagekräftigen Kanalkombinationen mit den im Untersuchungsgebiet vorgefundenen lithostratigraphischen und geobotanischen Gegebenheiten verglichen. Aufgrund der Heterogenität des Untersuchungsgebietes bietet sich eine den regionalen Gegebenheiten angepasste Kombination der multispektralen Satellitendaten an. So besitzt die aus der Landsat ETM+-Szene generierte klassische „Mineral Composition“ einen besonders hohen Informationsgehalt in quartären Ablagerungen. In der Festgesteinskartierung eignet sich z. B. eine Kanalkombination der Hauptkomponenten der ASTER-Szene, welche im Gegensatz zur ETM+-Szene, mit einer Auflösung von 15 m kleinmaßstäbliche Untersuchungen ermöglicht.

1 Einführung

Die Fernerkundung macht sich die Tatsache zu Nutze, dass die von der Sonne emittierte Strahlung auf unterschiedlichster Weise mit den bestrahlten Objekten in Interaktion tritt. Die Art und Größe der Interaktion hängt dabei von der Wellenlänge und den Eigenschaften des bestrahlten Materials ab, wobei folgende Arten von Interaktion eintreffen können: Reflektion, Transmission und Emission. Mit Hilfe von Radiometern, wie wir sie an Bord von Satelliten, z. B. Landsat 7 und Terra (EOS-AM1) finden, kann die eingehende Strahlung gemessen werden. Hierbei wird durch die orthogonale Optik gewährleistet, dass hauptsächlich die reflektierte bzw. emittierte Strahlung, ausgehend vom aufgenommenen Objekt, gemessen

¹ Geologisch-Paläontologisches Institut, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Corrensstr. 23, 48149 Münster, e-mail: qwe@uni-muenster.de

² Dr. Torsten Prinz, Informations-Verarbeitungs-Versorgungseinheit (IVV) Geowissenschaften, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Robert-Koch-Str. 26-28, 48149 Münster, e-mail: prinz@uni-muenster.de

wird. Durch das für jedes Material charakteristische Verhältnis von absorbierter und reflektierter Strahlung in bestimmten Wellenlängen ergeben sich Reflektionssignaturen, mit deren Hilfe sich verschiedene Materialien identifizieren lassen (GUPTA, 2003). Mittlerweile gibt es eine Vielzahl von verschiedenen multispektralen Satellitensystemen, welche für fernerkundlich gestützte geologische Untersuchungen herangezogen werden. Daher soll hier am Beispiel der geologischen Kartierung des Finke Gorge National Parks ein Vergleich von Landsat ETM+- und ASTER-Daten im Hinblick auf ihre geologische, lithologische, mineralogische, aber auch geobotanische Aussagekraft stattfinden.

2 Untersuchungsgebiet

Der Finke Gorge National Park befindet sich im semiariden Teil Zentralaustraliens, ca. 120 km SSW von Alice Springs. Strukturgeologisch gehört das Untersuchungsgebiet zum Amadeus Basin, einem Teil der neoproterozoischen bis paläozoischen transaustralischen Faltungszone (WOPFNER, 1997).

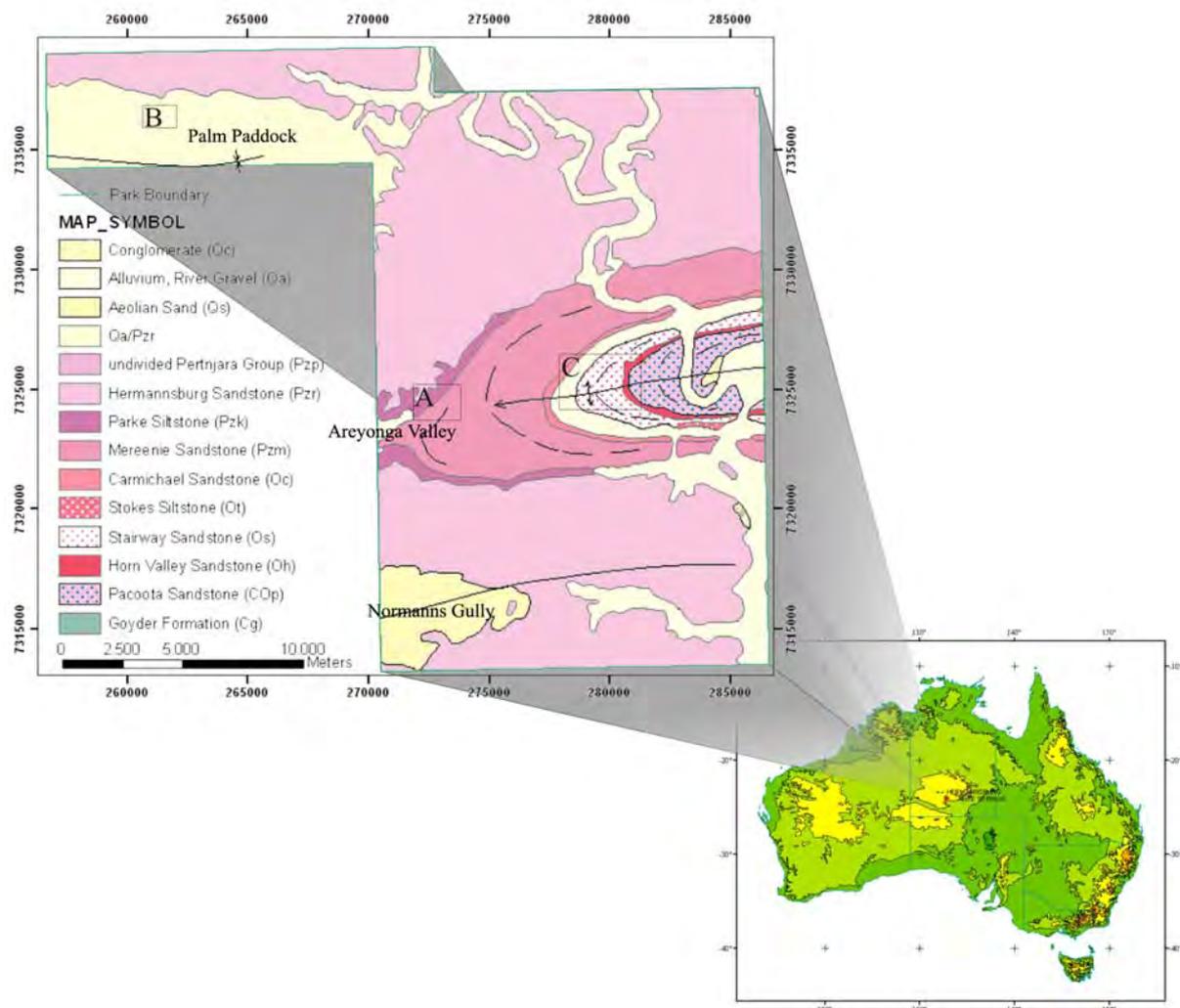


Abb. 1: Geologische Karte Finke Gorge National Park (SG 5301) (modifiziert nach COOK, 1968) mit Lage der Testgebiete A-C

Die aufgeschlossenen klastischen Gesteine der Amadeus Basin Sequence (WELLS ET AL., 1970) wurden während der Alice Springs Orogenese (400-300 Ma) (siehe z. B. HAND &

SANDIFORD, 1999, FLÖTTMANN & HAND, 1999, CARTWRIGHT ET AL., 1999, BEEKMAN ET AL., 1997) in weite Falten gelegt. Als Abscherungshorizont dienen hierbei die evaporitischen Gesteine der jungproterozoischen Bitter Springs Formation (LINDSAY, 1987, TEYSSIER, 1985). Der südliche Teil des Nationalparks ist gekennzeichnet durch seine streichenden Rücken und Täler des James Ranges, wobei die Rücken von verwitterungsbeständigen cambrisch-ordovizischen Sandsteinen und Quarziten des Stairway Sandstones und Pacoota Sandstones gebildet werden. Die zwischengeschalteten devonischen Siltsteine des Parke Siltstone und die ordovizischen Siltsteine des Stokes Siltstone, Stairway Sandstone und Horn Valley Siltstone bilden die Täler und sind schlecht aufgeschlossen (COOK 1968, WELLS ET AL., 1970). Weite Areale des Parks werden von den flachen Sattel- und Muldenkernen (Normans Gully, Areyonga Valley, Palm Paddock) eingenommen (Abbildung 1), aus welchen sich z. T. mächtige Zeugenberge erheben (Palm Paddock). Hier haben sich z. T. mehrmals umgelagerte aeolische und fluviatile quartäre Sedimente abgelagert. Das Gebiet innerhalb des Nationalparks besitzt im Gegensatz zum umliegenden Land eine vielfältigere und dichtere Vegetation, welche in manchen Bereichen die lithologische und mineralspezifische Untersuchung erschwert. Allerdings kann die Verbreitung geobotanisch selektiver Pflanzengemeinschaften für die Identifizierung von unterschiedlichen Böden und aufgeschlossenen Gesteinen, aber auch für die strukturgeologische Kartierung genutzt werden.

3 Technischer Vergleich

3.1 ASTER

ASTER ist Teil der Terra Plattform, welche zu einer neuen Generation von internationalen Satelliten gehört, die globale Klimaveränderungen beobachten. Die Terra Plattform wurde im Dezember 1999 in die erdnahe Umlaufbahn in 705 km geschossen und durchfliegt alle 16 Tage den gleichen Orbit. Die Hauptaufgabe von Terra besteht darin, Zustandsparameter der Erde und deren Atmosphäre zu beobachten und zusätzlich ein Langzeit Monitoring des anthropogenen Einflusses auf die Umwelt zu gewährleisten (KAUFMANN ET AL., 1998). Zu diesem Zwecke befinden sich insgesamt fünf Instrumente an Bord der Terra, darunter auch das ASTER-Instrument. Der ASTER-Scanner liefert multispektrale Satellitenbilder mit unterschiedlicher spektraler und räumlicher Auflösung (siehe Abbildung 2), wobei eine Szene eine Fläche von 60 mal 60 km abdeckt. Der ASTER-Scanner besteht aus drei Untersystemen, dem VNIR-Instrument (visible and near- infrared) mit einer geometrischen Auflösung von 15 m, dem SWIR-Instrument (shortwave infrared) mit 30 m Auflösung und dem TIR-Instrument (thermal infrared) mit 90 m Auflösung. Weitere Details über den technischen Aufbau der einzelnen Untersysteme von ASTER und ihrer Funktion sind dem „Aster User Handbook“ (ABRAMS ET AL., 2002) zu entnehmen.

3.2 Landsat ETM+

Der Landsat ETM+ ist ein multispektraler Scanner, ähnlich dem des ASTER, welcher an Bord des Landsat 7 in einer Umlaufbahn in 705 km Höhe seit April 1999 arbeitet. Der ETM+ stellt die erfolgreiche Weiterentwicklung des TM (Thematic Mapper), der seit 1982 an Bord von Landsat 4 und später auch in Landsat 5 eingesetzt wurde, dar. Der ETM+ liefert multispektrale Satellitenbilder mit einer Abdeckung von 170 mal 183 km und einer Auflösung von 30 m (Kanal 1-5 und 7) bzw. 120 m (Kanal 6). Die Kanäle 1-7 des Landsat ETM+ decken ein ähnliches Spektrum der elektromagnetischen Strahlung wie ASTER ab (vgl. Abbildung 2). Im sichtbaren und nahen Infrarot besitzt Landsat TM sogar einen Kanal mehr (Kanal 1), allerdings besitzt der Landsat TM im SWIR und TIR nur drei, mit sehr

großen Bandbreiten aufgenommene Kanäle (Kanal 5-7). Der sich an Bord von Landsat 7 befindliche ETM+ besitzt einen zusätzlichen panchromatischen Kanal (Kanal 8), welcher die gleiche räumliche Auflösung wie die VNIR-Kanäle des ASTER bietet. Genaueres kann aus dem „Landsat 7 Science Data Users Handbook“ (NASA, 2004) entnommen werden.

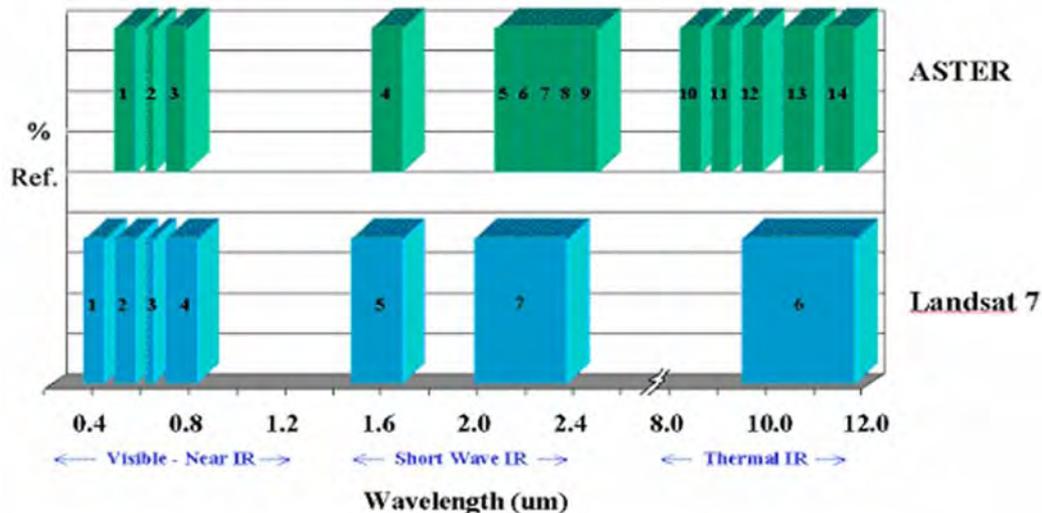


Abb. 2: Vergleich der spektralen Auflösungen von ASTER und Landsat 7 (aus ABRAMS ET AL., 2002)

Eine rein auf den technischen Parametern durchgeführte Bewertung der unterschiedlichen Satellitendaten deutet, im Hinblick auf eine geologische Interpretation der Fernerkundungsdaten zunächst, auf einen höheren Informationsgehalt der ASTER-Szene hin (vgl. Abbildung 2).

4 Vorbereitung der Datensätze

Um vergleichende Betrachtungen der Datensätze durchführen zu können, müssen die Datensätze (ASTER Level 1A und Landsat ETM+ Level 1G), soweit es möglich ist, auf das primäre physikalische Signal des gescannten Objektes reduziert werden. Hierzu wurden die Datensätze einer radiometrischen, atmosphärischen und topographischen Korrektur unterzogen.

Die vom LP-DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center) bezogene ASTER-Szene wies, entsprechend ihrem Scanverfahren, unterschiedlich starke Scanstreifen auf, wobei der Kanal 3 besonders stark betroffen war. Diese Streifung wurde mit dem für Landsat TM-Szenen in Erdas Imagine implementierten Tool „Destripe TM Data“ entfernt. Danach konnten die Daten mit Hilfe der im Metafile enthaltenen „Unit conversation coefficient“ radiometrisch korrigiert, und auf Grundlage von hochauflösendem und mit GCP's (Ground Control Points) korrigiertem Luftbildmosaik georektifiziert werden.

Die vom GLCF (Global Land Cover Facility) bezogene Landsat ETM+-Szene ist bereits geometrisch korrigiert; allerdings erwies sich diese als nicht ausreichend und wurde daher ebenfalls mit dem Luftbildmosaik georektifiziert. Die radiometrische Kalibrierung erfolgte mit Hilfe des „Landsat 7 Science Data Users Handbook“, in dem alle notwendigen Schritte erläutert sind.

4.1 Atmosphärische Korrektur

Die im Sensor eintreffende elektromagnetische Strahlung (at-satellite radiance) setzt sich aus der reflektierten Strahlung des gescannten Objektes, der Nachbarpixel-Reflektion und der direkt in der Atmosphäre reflektierten Strahlung zusammen (ATZBERGER, 2002). Berücksichtigt werden muss außerdem der Anteil der Sonnenstrahlung, der durch Aerosolstreuung und der Interaktion mit atmosphärischen Gasen (Ozon, Sauerstoff, Wasserdampf und Kohlendioxid) absorbiert wird. Datensätze, für die keine atmosphärische Korrektur durchgeführt wurde, erlauben spektrale Analysen nur innerhalb der zu untersuchenden Szene. Für Vergleiche mit anderen Szenen und spektralen Bibliotheken muss eine atmosphärische Korrektur stattfinden. Die hier durchgeführte atmosphärische Korrektur nach der im „Landsat 7 Science Data Users Handbook“ aufgeführten Form berücksichtigt allerdings nicht die Effekte der Aerosolstreuung. Die notwendigen spektralen Bestrahlungsstärken für die ASTER-Daten beruhen auf zwei unterschiedlichen atmosphärischen Modellen: 1. WRC (World Radiation Center), 2. Modtran (Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance Model). Für die Landsat ETM+-Daten stammen diese notwendigen Parameter aus dem „Landsat 7 Science Data Users Handbook“.

4.2 Topographische Korrektur

Die bei der Aufnahme von digitalen fernerkundlichen Bildern gemessenen Strahlungsintensitäten werden unter anderem vom Stand der Sonne zum Aufnahmezeitpunkt und von der Topographie des Untersuchungsgebietes bestimmt. Dieser Effekt wird als „topographischer Effekt“ bezeichnet (ERDAS LLS, 2002). Die dabei entstandene radiometrische Verzerrung kann mit Hilfe eines Höhenmodells und einigen Aufnahmeparametern korrigiert werden. Hierdurch lassen sich die zur Untersuchung herangezogenen, unter unterschiedlichen Sonnenständen aufgenommenen Aufnahmen, korrelieren. Der resultierende „topographische Effekt“ kann mit zwei unterschiedlichen Modellen berechnet werden, dem Lambert'schen und dem nicht-Lambert'schen Reflektionsmodell, wobei sich gezeigt hat, dass das nicht-Lambert'sche Reflektionsmodell bessere Ergebnisse liefert. Der Vergleich der resultierenden Reflektionsspektren eines zufällig ausgewählten Messpunktes innerhalb des Untersuchungsraums zeigt sehr geringe Unterschiede zwischen der Landsat ETM+- und der ASTER-Szene (Abbildung 3).

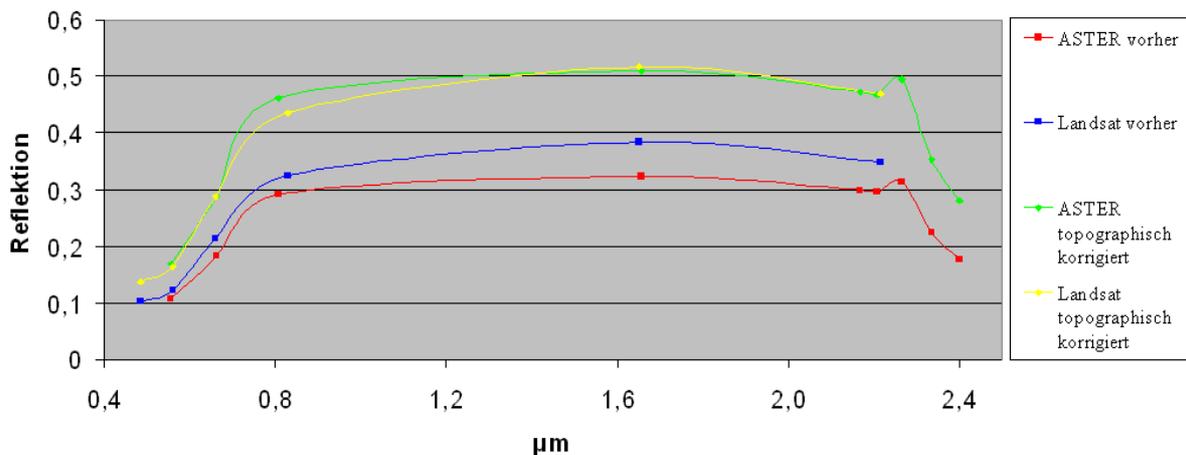


Abb. 3: Vergleich der Reflektionsspektren (Messpunkt: R 269585, H 7332323) von ASTER und Landsat ETM+ vor und nach der topographischen Korrektur

Die Gesamtheit der Reflektionswerte für die mit gleichen Bandbreiten aufgenommenen Kanäle 2 (ASTER) und 3 (Landsat ETM+) ergibt sehr geringe absolute Abweichungen von maximal 0,05 bis -0,05 voneinander. Nur in Bereichen mit unterschiedlichem Schattenwurf und in Flussbetten, welche kurzzeitigen und starken ökologischen Schwankungen ausgesetzt

sind (Überflutungsereignisse), ergeben sich größere Abweichungen. Diese Resultate zeigen, dass sich die unterschiedlichen Satellitensysteme (ASTER, Landsat ETM+) nach einer entsprechenden radiometrischen, geometrischen und topographischen Korrektur gut korrelieren lassen und sehr übereinstimmende Reflektionsspektren für gleiche Messpunkte liefern. Auf dieser Grundlage lassen sich nun vergleichende Betrachtungen der unterschiedlichen Daten, in Bezug auf ihre geologische Aussagekraft, unter Berücksichtigung der erwähnten auszuschließenden regionalen Bereiche, durchführen.

5 Informationsgehalt

Grundsätzlich gibt es zwei methodische Ansätze, den geologischen Informationsgehalt der einzelnen Bilder zu bewerten. Zum einen mit mathematischen Pixeloperationen, wie z. B. der Bildung von Ratios, HK, OIF usw. und zum anderen mit dem Vergleich der Reflektionsspektren mit im Labor oder im Feld gemessenen Absorptionsspektren. An dieser Stelle soll allerdings nur auf die mathematischen Pixeloperationen eingegangen werden, da der Vergleich der satellitengestützten multispektralen Daten mit kontinuierlichen Absorptionsspektren, gewonnen unter Laborbedingungen, zahlreichen Einschränkungen (begrenzte Anzahl an Kanälen, unzureichende atmosphärische Korrektur, Mischpixel usw.) unterliegt.

Im Folgenden soll nun anhand von ausgewählten Testgebieten (vgl. Abbildung 1) untersucht werden, inwieweit die verschiedenen Pixeloperationen hilfreich bei der Interpretation von lithogeologischen und geobotanischen Fragestellungen sind. Nach der OIF-Berechnung (PRINZ, 1996, ZUMSPREKEL & PRINZ, 1998) erwies sich die Kanalkombination 456 für die Landsat ETM+-Szene vom 09.09.2000 und 346 für die ASTER-Szene vom 21.06.2000 als mathematisch objektiv am aussagekräftigsten. Abbildung 4 zeigt die Kanalkombination 456 für die ETM+-Szene des **Testgebietes A** und zusätzlich den Ausschnitt der offiziellen geologischen Karte (vgl. Abbildung 1) sowie den eines hochauflösenden Luftbildes. Der Vergleich zeigt deutlich, dass eine Unterscheidung zwischen den lithologisch heterogenen Einheiten des Mereenie Sandstones (südliche gelbliche Bereiche), Parke Siltstone (blaue Bereiche) und dem Hermannsburg Sandstone (nördliche höher gelegene gelbliche Bereiche) auf Grundlage der Kanalkombination 456 der Landsat ETM+-Szene möglich ist. Allerdings würde eine Unterscheidung zwischen den lithologisch ähnlichen Hermannsburg Sandstone und Mereenie Sandstone nicht gelingen.

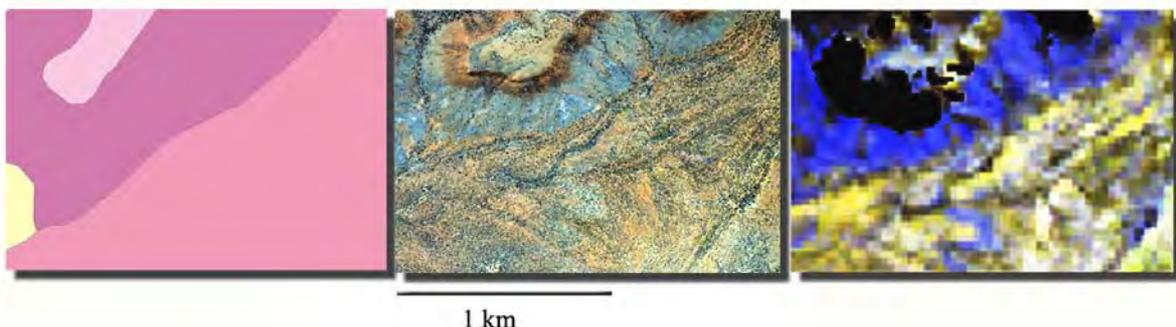


Abb. 4: (v.l.n.r.) geologische Karte, Luftbild und OIF (Kanal 4,5,6) der Landsat ETM+-Szene für das Testgebiet A

Die standardisierte Index- bzw. Ratiobildung (Vegetationsindex, Tonminerale, Eisenoxide usw.) für Landsat-TM und -ETM+ erbrachte durchweg gute Ergebnisse. Als besonders aussagekräftig erwies sich die Layerkombination der klassischen „Mineral Composition“. Für die ASTER-Szene wurden ebenfalls Ratios in vergleichbaren Bandbreiten berechnet, wobei aufgrund der Kanalverteilung anzunehmen war, dass sich z. B. für das Tonminerale sensitive Ratio im SWIR bessere Ergebnisse erzielen lassen. Allerdings konnten diese nicht festgestellt werden, und zusätzlich fielen die auf VNIR beruhenden Ratios (z. B. Eisenoxide) kontrastärmer aus. Die Abbildung 5 zeigt den Ausschnitt der „Mineral Composition“ der Landsat ETM+-Szene für das **Testgebiet B**, wobei rote Farben für Tonminerale, grüne Farben für eisenhaltige Minerale und blaue Farben für Eisenoxide stehen. Die in der Vegetationskarte abgebildeten Vegetationsgemeinschaften lassen sich zum größten Teil in der „Mineral Composition“ wieder finden. Die auch im Luftbild leicht erkennbaren schwach bewachsenen Dünen werden in der „Mineral Composition“ (Abbildung 5 rechts) mit gelben Farbtönen wiedergegeben. Die durch aufsteigende Grundwässer gebildeten Kalkrete-Böden sind dicht bewachsen (Spinifex-Grass) und erscheinen in Abbildung 5 rechts in blauen Farben (im Luftbild dunkel und in der Vegetationskarte braun). Der das Testgebiet durchquerende Flusslauf ist ebenfalls durch seine dunkle Farbgebung gut zu erkennen. Auffällig erscheint auch die in Richtung ENE verlaufende lineare gelblich rote Struktur in den nördlichen kalkretischen Ablagerungen. Vermutlich handelt es sich hierbei um eine von den Rangern angelegte Brandschneise entlang eines Weges, wie sie im ganzen Park zu finden sind. Die besonders im südlichen Testgebiet B zu findenden weniger dicht bewachsenen (Buffel-Grass), aus aeolischen und fluviatilen fein- bis mittelkörnigen Sande bestehenden Böden werden im „Mineral Composition“ mit lila-roten Farben wiedergegeben.

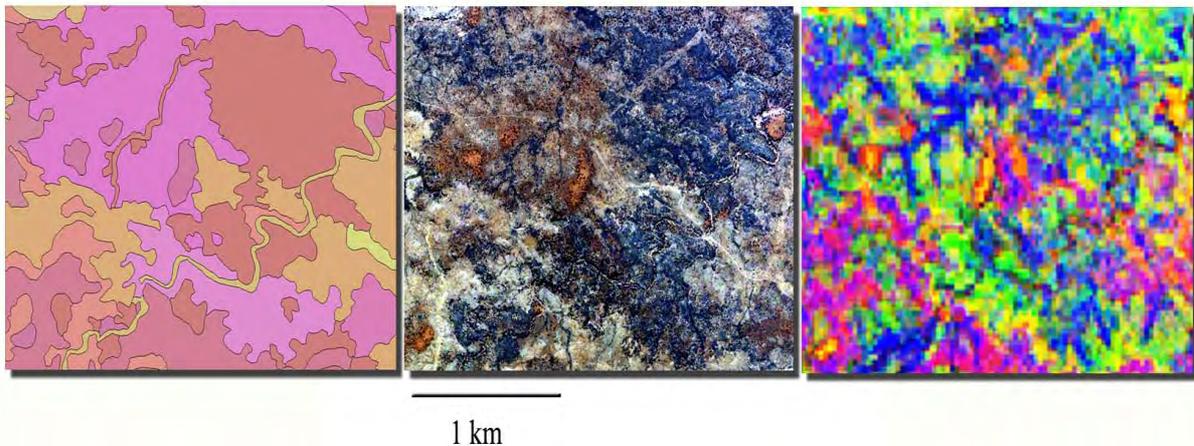


Abb. 5: (v.l.n.r.) Vegetationskarte, Luftbild und „Mineral Composition“ der Landsat ETM+-Szene für das Testgebiet B

Die Generierung von Hauptkomponenten für die multispektralen Satellitenbilder zeigt ähnliche Vorteile wie die Ratiobildung. Der Vergleich der aus der ASTER-Szene generierten HK's mit denen der Landsat ETM+-Szene zeigt deutlich geringere Kontrastwerte; allerdings ist die räumliche Auflösung der ASTER HK's um den Faktor 2 besser. Abbildung 6 zeigt die Kanalkombination der HK 1-3 der ASTER-Szene für den Bereich des **Testgebietes C**. Die HK-Kanalkombination korreliert gut mit der dazugehörigen geologischen Karte, wobei besonders die Ausbisse des Carmichael Sandstone und des Stokes Siltstone zu erkennen sind. Der Carmichael Sandstone bildet das stark hervortretende rote Band im äußersten Nordwesten des Bildes. Der darunter anstehende stark verwitterungsanfällige Stokes Siltstone ist gekennzeichnet durch einen besonders dichten Bestand an kleineren Bäumen und Büschen (Akazien). Hierdurch lässt er sich in Abbildung 6 leicht durch seine hellgrüne Farbgebung identifizieren, wobei der tiefere Bereich des Stokes Siltstone von quartären

Ablagerungen des Circle Gully bedeckt wird. Die Grenze zum verwitterungsresistenten Stairway Sandstone ist durch den Übergang zu blauen- und lilafarbenen Pixeln klar zu erkennen. Der Horn Valley Siltstone bildet, genau wie die innerhalb des Stairway Sandstone befindlichen Siltsteinlagen, steile Abbruchkanten, welche in der Abbildung 6 rechts zumeist

helllila bis rot erscheinen. Der Pacoota Sandstone im Zentrum weist dunkelgrüne Farben auf und ist, wegen seiner lithologischen Ähnlichkeit zum untersten Stairway Sandstone, von selbem fernerkundlich nur schlecht zu unterscheiden.

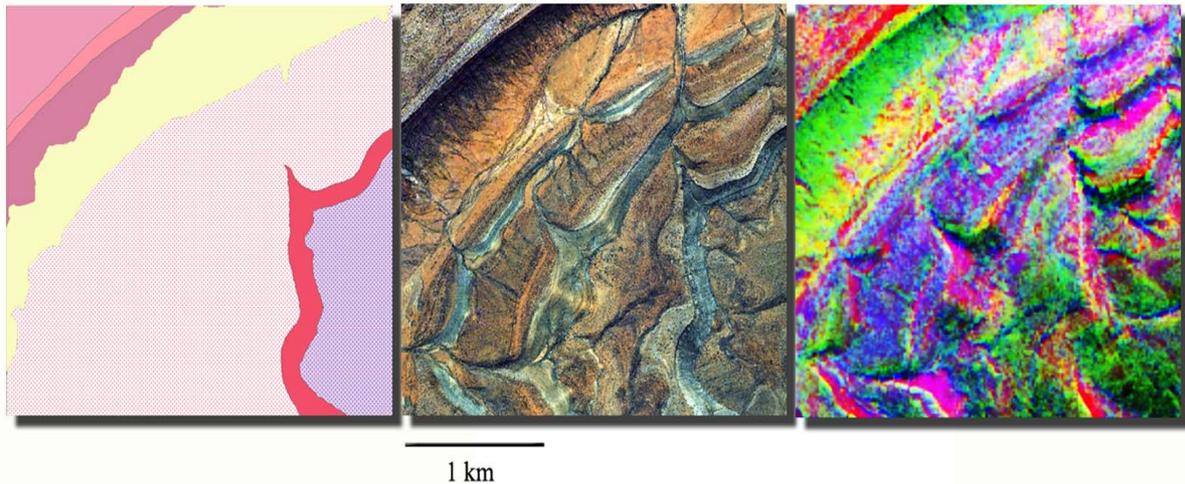


Abb. 6: (v.l.n.r.) geologische Karte, Luftbild und Falschfarbenkomposit der ASTER HK's für das Testgebiete C

Besonders in den von quartären Ablagerungen dominierten Senken im Untersuchungsgebiet (Palm Paddock, Normans Gully, Areyonga Valley, usw.) besitzen die aus der Landsat ETM+-Szene generierten Kanalkombinationen einen höheren lithologischen Informationsgehalt und erlauben differenziertere Kartierungen dieser Gebiete (vgl. Testgebiet B). Aufgrund der geringen lithologischen Variabilität ergeben sich für die von klastischen Festgesteinen dominierten Regionen nur begrenzte geologische und lithologische Unterscheidungsmöglichkeiten. Hinzu kommt eine Verschleierung der ursprünglichen Reflektionsspektren anderer Gesteinstypen (z. B. Tonsteine, Siltsteine) durch die spektrale Dominanz angrenzender Sandsteinformationen. Vielmehr lässt sich die Farbgebung in den erstellten Falschfarbenkomposit mit den vorhandenen Vegetations- bzw. Bodenkarten korrelieren, und nicht mit den im Untergrund anzutreffenden lithologischen Einheiten. Allerdings zeigt die Untersuchung im Testgebiet A und C, dass die Unterscheidungsmöglichkeit mit der Variabilität der mineralogischen Zusammensetzung korreliert.

6 Schlussfolgerungen

Das ASTER-Instrument zeichnet sich durch sein spektrales, räumliches und quantitativ hochwertiges Aufnahmeverfahren gegenüber dem Landsat ETM+-Instrument aus. Allerdings zeigen ASTER-Daten häufig eine aufnahmebedingte Scanstreifung, welche besonders bei mathematischen Pixeloperationen verstärkt wird und zu unzureichenden Ergebnissen führt. Aufgrund der lithologischen Konformität der meisten anstehenden geologischen Formationen im Untersuchungsraum, ist eine auf der Basis der hier herangezogenen multispektralen Satellitendaten gestützte geologische Kartierung schwierig. Allerdings zeigen die in den

Testgebieten durchgeführten vergleichenden Betrachtungen der verschiedenen Kanalkombinationen mit Vegetationskarten, geologischen Karten und Luftbildern z. T. zufrieden stellende Übereinstimmungen. Hervorzuheben ist die klassische „Mineral Composition“ der Landsat ETM+-Szene, die im Gegensatz zu der ASTER-Szene besonders in den quartären Ablagerungsräumen kontrastreicher und aussagekräftiger ist. Sie bietet eine sehr gute Grundlage für die Kartierung dieser Sedimente bzw. der Vegetationsgemeinschaften (vgl. Testgebiet B), eine Einschränkung stellt jedoch eine geometrische Auflösung von nur 30 m dar. Eine Kartierung auf der Grundlage der ASTER-Szene z. B. mit der Kanalkombination der HK's (vgl. Testgebiet C) könnte dagegen in einem um den Faktor 2 verbesserten Maßstab durchgeführt werden. Aufgrund der geobotanischen und lithologischen Heterogenität des Untersuchungsgebietes, bietet sich eine den regionalen Gegebenheiten angepasste Kombination der multispektralen Satellitendaten an.

7 Literatur

- ABRAMS, M., HOOK, S., & RAMACHANDRAN, B., 2002: ASTER User Handbook, Version2. – Jet Propulsion Labortary (JPL) & EROS Data Center.
- ATZBERGER, C., 2002: Remote sensing through the atmosphere – Physical principles and effects. – Abteilung Fernerkundung, Universität Trier.
- BEEKMAN, F., STEPHENSON, R., A., & KORSCH, R., J., 1997: Mechanical stability of the Redbank Thrust Zone, central Australia: dynamic and rheological implications. – Australian Journal of Earth Sciences 44, S. 215-226.
- CARTWRIGHT, I., BUICK, I., S., FOSTER, D., A., & LAMBERT, D., D., 1999: Alice Springs age shear zones from the southeastern Reynolds Range, central Australia. – Australian Journal of Earth Sciences 46, S. 355-363.
- COOK, P. J., 1968: Explanatory Notes Sheet Henbury, N.T., Sheet SG 5301. – Bureau of Mineral Resources, Geology and Geophysics, Canberra.
- ERDAS LLC 2002: Erdas Field Guide. – 6. Aufl., 686 S., Atlanta, Georgia.
- FLÖTTMAN, T., & HAND, M., 1999: Folded basement-cored tectonic wedges along the northern edge of the Amadeus Basin, Central Australia: evaluation of orogenic shortening. – Journal of Structural Geology 21, S. 399-412.
- GUPTA, R., P., 2003: Remote Sensing Geology. – 2. Aufl., 655 S., Springer-Verlag, Berlin.
- HAND, M., & SANDIFORD, M., 1999: Intraplate deformation in central Australia, the link between subsidence and fault reactivation. – Tectonophysics 305, S. 121-140.
- KAUFMANN, Y., J., HERRING, D., D., RANSON, K., J., & COLLATZ, G., J., (1998): Earth Observing System AM1 Mission to Earth. - IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 36 (4), S. 1045-1055.
- LINDSAY, J., F., 1987: Upper Proterozoic evaporites in the Amadeus basin, central Australia, and their role in basin tectonics. – Geol. Society of America Bulletin 99, S. 852-865.
- NASA 2004: Landsat Science Data Users Handbook. - Landsat Project Science Office, NASA, (http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html).
- PRINZ, T., 1996: Multispectral remote sensing of the Gosses Bluff impact crater, Central Australia (N.T.) by using Landsat-TM and ERS-1 data. - Photogr. & Rem. Sens., S. 137-149, Elsevier Amsterdam, Oxford.
- TEYSSIER, C. 1985: A crustal thrust system in an intracratonic tectonic environment. – Journal of Structural Geology 7 (6), S. 689-700.
- THOME, K., BIGGAR, S., & SLATER, P., 2001: Effects of assumed solar spectral irradiance on intercomparisons of earth-observing sensors. – (Proceedings SPIE Vol. 4540, S. 260-269; Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites, Fujisada H., Lurie J. & Weber K., Eds., 2001).
- WELLS, A., T., FORMAN, D., J., RANFORD, L., C., & COOK, P., J., 1970: Geology of the

- Amadeus Basin central Australia. – Bureau of Mineral Resources, Geology and Geophysics, Buttelin 100, Canberra.
- WOPFNER, H., 1997: Geologie der Erde Band 4: Australien. – 206 S., Enke Verlag, Stuttgart.
- ZUMSPREKEL, H., & PRINZ, T., 1998: Multispectral remote sensing of the archean Pilbara-Region, Western Australia. - Computer and Geosciences, Toronto.

Erfassung strukturgeologischer Daten in ariden Gebieten auf der Basis von digitalen Höhenmodellen und hochauflösenden stereographischen Luftbildern am Beispiel des intrakratonen Amadeus Basins, Finke Gorge National Park (Australien)

Tobias Karow¹ und Torsten Prinz²

Zusammenfassung: Mit Hilfe unterschiedlich auflösender, aus Fernerkundungsdaten abgeleiteter digitaler Geländemodelle wurde der Versuch unternommen, das strukturgeologische Inventar eines intensiv verfalteten Teilgebietes des Amadeus Beckens in Zentralaustralien aufzunehmen. Über eine modifizierte Dreipunktmethode wurden für große Areale Einfallswinkel und Einfallrichtung von sedimentären Schichtflächen bestimmt. Als Testgebiet diente der Finke Gorge National Parks, in dem insbesondere devone bis karbone Synklinal-, bzw. Antiklinalstrukturen der intrakratonen Alice Springs Tektogenese aufgeschlossen sind. Zur Überprüfung der Ergebnisse wurden in dem sedimentär geprägten Areal begleitende Strukturmessungen im Gelände durchgeführt. Auf dieser Grundlage fand eine qualitative Beurteilung der vorgestellten Methoden zur schnellen und hinreichend genauen Erfassung des großmaßstäblichen strukturgeologischen Inventars statt. Die Daten zeigten eine hohe Übereinstimmung mit den Verhältnissen vor Ort, jedoch war in Gebieten mit sehr flachem Einfallswinkel die Fehlerstreuung vergleichsweise groß. Die Qualität der Analyse ist direkt abhängig von der Genauigkeit des digitalen Höhenmodells, sowie den Interpolationsverfahren für das Modell. Häufige Probleme stellen steile morphologische Abbruchkanten, tiefe Erosionsrinnen oder Überhänge, sowie flach ausstreichende Schichtkämme dar, die infolge der Orthorektifizierung des Luftbildes Veränderungen in der Abbildung erfahren. Die besten Ergebnisse ließen sich in Gebieten mit ca. 45° Hangneigung und geringem Relief erzielen. Auf der Basis der gewonnenen Daten und der Kenntnis der Stratigraphie sowie der Lithologie ließen sich für den Untersuchungsraum mit Hilfe der oben aufgezeigten Methoden sedimentäre Mächtigkeitsprofile erstellen. Hierzu wurden u.a. bereits auf der Grundlage von multispektralen Daten und Geländearbeit erstellte lithologische Karten herangezogen. Verglichen mit den Geländedaten zeigten auch diese nur geringe Abweichungen.

1 Geographische und geologische Übersicht

Das Untersuchungsgebiet befindet sich ca. 120 km westlich von Alice Spring und ist deckungsgleich mit den Grenzen des Finke Gorge National Parks (NP) in den australischen Northern Territories. Von Alice Springs aus gelangt man über den Larapinta Drive nach Hermannsburg, einer kleinen ehemaligen deutschen Missionsstation. Von Hermannsburg aus folgt man dem Flussbett des Finke Rivers über 16 km in Richtung Süden, und erreicht dann Palm Valley, das Zentrum den Nationalparks.

¹ Geologisch-Paläontologisches Institut, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Corrensstr. 24, 48149 Münster, e-mail: karow@uni-muenster.de

² Dr. Torsten Prinz, Informations-Verarbeitungs-Versorgungseinheit (IVV) Geowissenschaften, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Robert-Koch-Str. 26-28, 48149 Münster, e-mail: prinz@uni-muenster.de

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Amadeus Basin, welches der großtektonischen trans-australischen Faltungszone angehört. Die hierzu zählenden neoproterozoischen bis paläozoischen Sedimentbecken bilden die Naht zwischen dem südwestlichen Kraton und dem nord-australischen Schild und sind nach Osten mit der Tasman Geosynklinale verbunden (Wopfner, 1997). Hierzu zählen die Adelaide Geosynklinale, Bancannia Trog, Warburton Becken, Amadeus Becken, Nagalia Becken und das Canning Becken. Genetisch mit der trans-australischen Faltungszone und besonders mit dem Amadeus und Ngalia Becken verbunden sind außerdem noch die Sedimentbecken der umliegenden Plattformen, wie z. B. Georgina und Officer Becken (WELLS ET AL., 1970). Den unterschiedlichen Regionen der trans-australischen Faltungszone ist gemein, dass sie alle durch die kaledonisch-variszische Orogenphase deformiert wurden und die Richtungen der Strukturelemente übereinstimmen. Die letzte Faltungsphase von der alle Provinzen beeinflusst wurden war die Alice Springs Orogenese, die zeitlich mit der Kanimbla Orogenese in der Tasman Geosynklinale zusammenfällt (CARTWRIGHT ET AL., 1999, BEEKMAN ET AL., 1997, HAND & SANDIFORD, 1999).

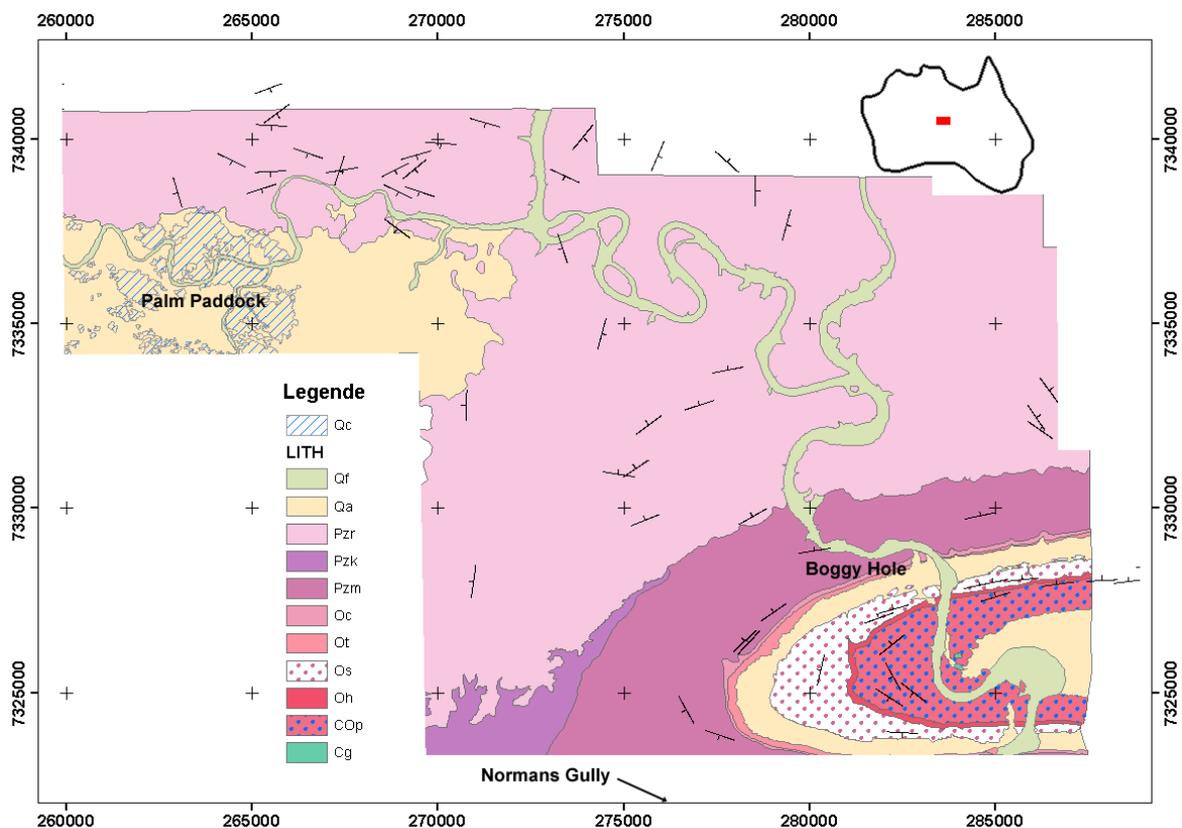


Abb. 1: Geologische Übersichtskarte mit Ortsangaben

Das zu untersuchende Areal beinhaltet Syn- und Antiklinalstrukturen. Die zentrale Antiklinalstruktur der James Ranges besteht aus den sehr kompetenten Quarziten des ordovizischen Stairway Sandstone wie des cambrisch-ordovizischen Pacoota Sandstone. In den zwischengelagerten Tälern dieser Struktur stehen weichere ordovizische Siltsteine wie der Horn Valley Siltstone und der Stokes Siltstone an (COOK, 1968). Die nördlich angrenzende Antiklinale, welche das Palm Valley und Palm Paddock bildet, wie auch die südlich angrenzenden Strukturen des Normans Gully bestehen aus dem, über weite Bereiche homogen anstehenden, carbonischen Hermannsburg Sandstone (Abb.1).

3 Methodischer Ansatz

Die Akquisition strukturgeologischer Daten in einem weitläufigen und nur schwer zugänglichem Areal stellt als reine Geländearbeit eine zeitaufwendige und somit kostenintensive Arbeit dar. Eine ökonomische Alternative stellt in diesem Zusammenhang ein Geoinformationssystem dar, in das durch Fernerkundungsdaten gewonnene Höhenmodelle eingebunden sind. Dieses beinhaltet digitale Werkzeuge mit denen sich wie im Gelände Messdaten erheben lassen. Geoinformationssysteme bieten schon seit Jahren die Möglichkeit neue synthetische Daten zu erheben, zu verschneiden und im Vergleich mit Geländedaten zu überprüfen. Strukturgeologische Daten lassen sich durch Lineationskartierungen oder über die Dreipunktmethode (Abb. 2) auf der Basis Topographischer Daten gewinnen.

Das Vorgehen wird allerdings erschwert, wenn keine genauen oder nur großmaßstäbliche Daten im Vorfeld der Arbeit zur Verfügung stehen. Im Falle der Untersuchung im Finke Gorge National Park erreichen die amtlich topographischen Basisdaten nur eine Auflösung von 1:250.000 und bieten für eine angestrebte kleinmaßstäbliche geologische Karte im Maßstab 1:10.000, unzureichende Basisinformationen. Aufgrund der fortschreitenden Rückübereignung großer Gebiete Zentralaustraliens an die Urbevölkerung, ist jedoch die Bewegungsfreiheit in vielen Teilen der Region eingeschränkt und somit die Möglichkeit einer kontinuierlichen Datenerfassung vor Ort nicht gegeben.

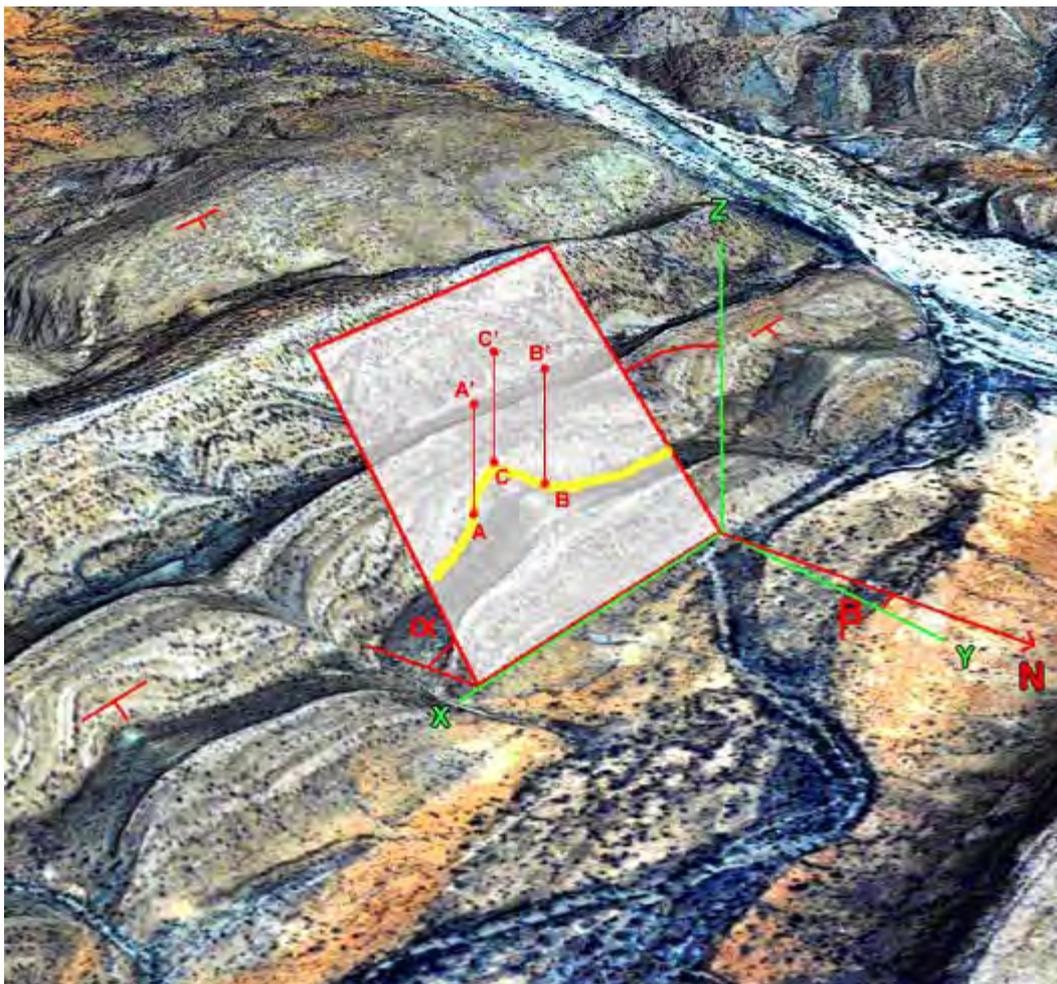


Abb. 2: Theoretische Darstellung der Datenerhebung auf der Basis eines aus hochauflösenden Luftbildern und des daraus erstellten Höhenmodells bestehenden 3D Modells

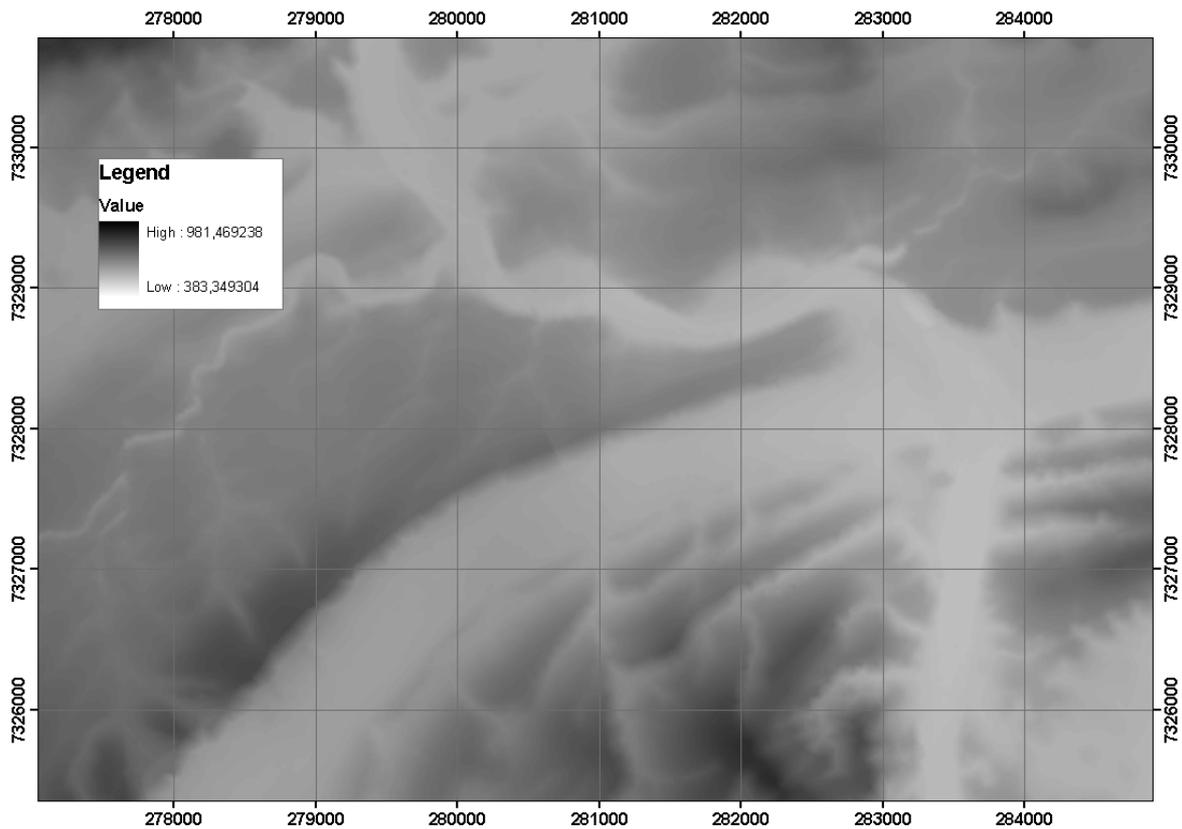


Abb. 3: Ausschnitt des berechneten Höhenmodells. Die Gitterweite beträgt 15m.

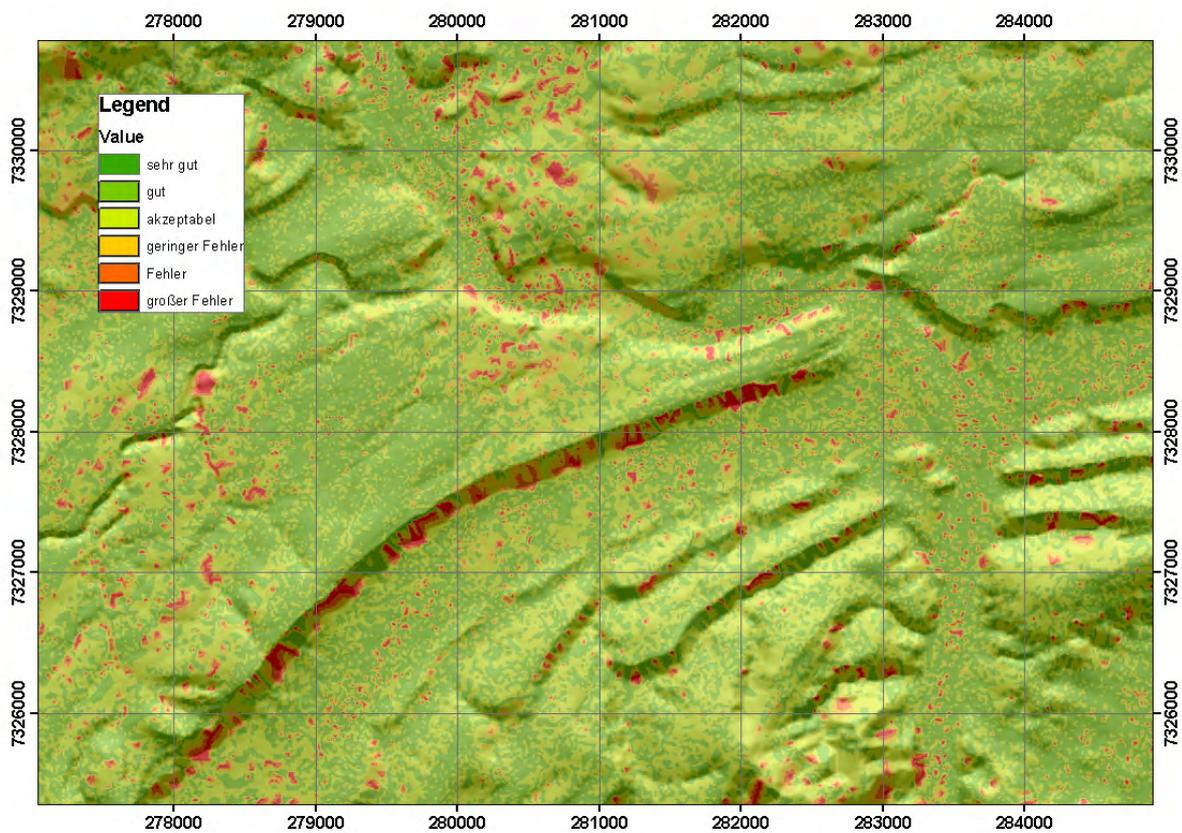


Abb. 4: Fehlerverbreitung im Höhenmodell. Deutlich zu erkennen sind die steilen Abbruchkanten

4. Generierung eines Höhenmodells

Durch eine Zusammenarbeit mit der Naturschutzbehörde *Parks And Wildlife NT* ergab sich der Zugang zu stereographischen Luftbilddaten und differentiell gemessenen Vollpasspunkten mit einer Lagegenauigkeit unter einem Meter in horizontaler Lage, wie auch der Höhe. Aus dieser stereographischen Luftbildbefliegung (2m / Pixel) wurde ein Höhenmodell berechnet (Abb. 3). Hieraus ergab sich ein digitales Höhenmodell mit einer Gitterweite von 15m. Zusätzliche wurden während der Triangulation Aussagen über die Fehlerverbreitung im Höhenmodell erfasst (Abb. 4).

Die Mehrzahl der Fehler im Höhenmodell ergeben sich durch Unterschiede im Bildkontrast der einzelnen Bilder. Gerade in Flächen mit hoher Reflektion und geringem Relief ist es im Überlappungsbereich der Bilder schwer Verknüpfungspunkte zu finden, welche zur Berechnung des Höhenmodells herangezogen werden. Dies gilt auch für verschattete Bildflächen, wie z.B. an steilen Abbruchkanten.

5 Dreipunktmethode

Alle oben beschriebenen Mängel des Höhenmodells und die daraus resultierenden Fehler bei der Orthorektifizierung der Luftbilddaten beeinflussen die Anwendung der modifizierten Dreipunktmethode. Es kann also nicht an jeder beliebigen Stelle des Modells ein repräsentativer Messwert genommen werden. Um den Fehler möglichst gering zu halten, wurde darauf geachtet, die drei Punkte möglichst so zu wählen, dass sie ein gleichseitiges Dreieck mit einer Kantenlänge von mindestens 100m aufspannen. Diesem Vorgehen liegt die Annahme zugrunde, dass der, durch das Digitalisieren der Punkte entstehende horizontale Fehler höchsten zehn Meter beträgt. Die hierdurch entstehende Variation in der Kantenlänge des Dreiecks beträgt somit höchsten zehn Prozent der Gesamtlänge. Die durch die Digitalisierung entstehende Ungenauigkeit und die hieraus bedingte Fehlervererbung auf den Messwert bleibt gering. Beachtet man diese Richtlinien, so lassen sich Messwerte mit hinreichender Genauigkeit erzeugen.

6 Qualitative Überprüfung der Messwerte

Um für die unzugänglichen Gebiete eine Qualitätskontrolle durchzuführen wurden theoretische Testwerte erzeugt, denen drei Punkte, welche ein gleichseitiges Dreieck mit der Kantenlänge 100 m bilden, zugrunde liegen. Dieses Dreieck definiert eine Fläche, welche die zu messende Schicht repräsentiert. Für diese Fläche wurde der Einfallswinkel langsam von 1° - 80° erhöht und den Eckpunkten des Dreiecks ein zufälliger künstlicher Fehler zwischen 0m - 10m in horizontaler wie vertikaler Lage aufaddiert (Abb. 5).

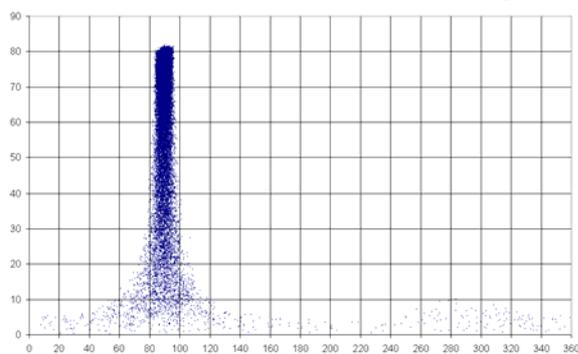


Abb. 5: Punktstreuung bei 10m Fehler (höchster angenommener Fehler). Auf der x-Achse ist die Einfallrichtung aufgetragen, die y-Achse zeigt den Einfallswinkel

Die Werte nähern sich mit zunehmendem Einfallswinkel den realen Verhältnissen an. Selbst bei der Fehlerannahme von 10m ergibt sich noch eine tolerierbare Abweichung. Entnimmt

man die drei Punkte Regionen mit geringem Relief, so bleibt der tatsächliche Fehler aber weit unter 10m. Für die Berechnung des Einfallswinkels wie auch der Einfallrichtung gilt:

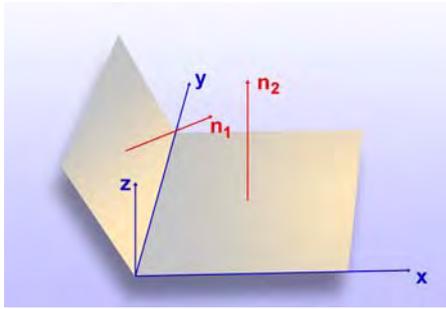


Abb. 6: Schematische Darstellung der Normalenvektoren

Ausgangsformel:

Gegebene Normalenvektoren:

$$n_1 = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} \quad n_2 = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix}$$

,wobei n_1 die Orientierung der geologischen Schicht repräsentiert und n_2 eine horizontale Ebene darstellt

Die Formel zur Berechnung des Winkels zweier Ebenen zueinander lautet:

$$\rightarrow \cos \gamma = (x_1x_2 + y_1y_2 + z_1z_2) : (x_1^2 + y_1^2 + z_1^2)^{1/2} \cdot (x_2^2 + y_2^2 + z_2^2)^{1/2} \quad (1)$$

Berechnung des Einfallswinkels:

Gegebene Normalenvektoren:

$$n_1 = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} \quad n_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\rightarrow \cos \alpha = (z_1 \cdot 1) : (x_1^2 + y_1^2 + z_1^2)^{1/2} \quad (2)$$

Berechnung der Einfallrichtung:

Gegebene Normalenvektoren:

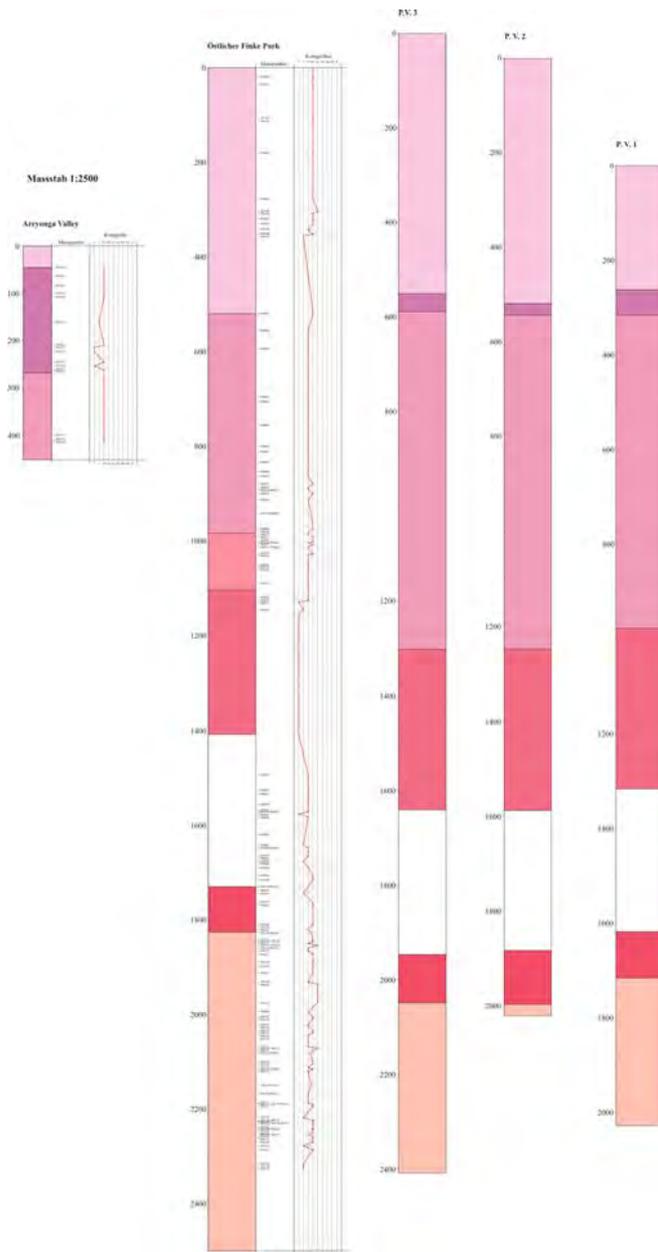
$$n_1 = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad n_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\rightarrow \cos \beta = 1 : (x_1^2 + y_1^2)^{1/2} \quad (3)$$

Da der Arcuscosinus der Formel nur Werte von 0°-90° ausgibt muss je nach Orientierung der Normalenvektoren eine Fallunterscheidung getroffen werden.

Die im Gelände gemessenen Werte zeigen in der von ihnen abgedeckten Region eine hohe Übereinstimmung mit den synthetisch generierten Daten der modifizierten Dreipunktmethode. Die exaktesten Messungen ließen sich an der zentralen Antiklinalstruktur im Stairway Sandstone und im Mereenie Sandstone durchführen. Hier bieten die Flatiron-Strukturen gute Aufschlussverhältnisse (Abb. 2). Die Messungen im Hermannsburg Sandstone sind, aufgrund des nach Norden abnehmenden Schichteinfallens und des homogenen Erscheinungsbildes der Einheit im Luftbild, mit einem geringen Fehler behaftet. Das geringe Relief ist verantwortlich dafür, dass die Ausbisslinien, an denen die Messwerte genommen werden, geradlinig verlaufen und somit der Optimalzustand eines gleichseitigen

Dreiecks, welches den geringsten Fehler beinhaltet, nicht erreicht werden kann. Es wurde versucht sich auf Regionen um Erosionsrinnen zu konzentrieren. Hier zeigen sich U-förmige Ausbisslinien, an denen der Optimalzustand erreicht werden kann. Diese Erosionsrinnen bieten jedoch oft steile Abbruchkanten und sind deshalb unter Vorsicht zu verwenden. Aus diesen synthetisch generierten Werten lassen sich nun, unter Kenntnis der Lithologie, sedimentäre Mächtigkeitsprofile erstellen. Durch die Berechnung der Ebenenabstände der Grenzschichten lassen sich Aussagen über die Mächtigkeiten der einzelnen stratigraphischen Einheiten treffen (Abb. 7).



7 Vorläufige Ergebnisse

Anhand der Streichkarte (Abb. 8) lässt sich die Nord-Süd Einengung des Amadeus Basins während der Alice Springs Orogenese nachvollziehen (COOK, 1968, FLÖTMANN & HAND, 1999). Der nördliche Teil des Amadeus Beckens, welcher das Untersuchungsgebiet beinhaltet, wurde während der Alice Spring Orogenese um ca. 200 km in Nord-Süd Richtung verkürzt (COOK, 1968).

BERRY, STEARNS & FRIEDMAN (1996) geben die Richtung des maximalen Stress mit 340° an. Diese Werte entstammen Prospektionsbohrungen im Zuge der Erschließung des Palm Valley Gas Field. Diese Orientierung lässt sich auch im südlichen Teil des Untersuchungsgebietes wiederfinden. Dafür sprechen die Ausrichtung der Faltenachsen wie auch die NO-SW und die NW-SO Tendenz der Lineationen. Ebenso bestätigen die Geländeaufnahmen dieses Bild (BUDE, 2002). In den kompetenten quarziti-schen Gesteinen des Hermannsburg Sandstone wie auch Carmichael Sandstone und Mereenie Sandstone tritt dieses Kluftmuster hervor.

In den duktilen der schlechten Aufschlussverhältnisse, wie auch der mangelnden Resistenz nicht verfolgen.

Abb. 7: Lithologisches Mächtigkeitsprofil

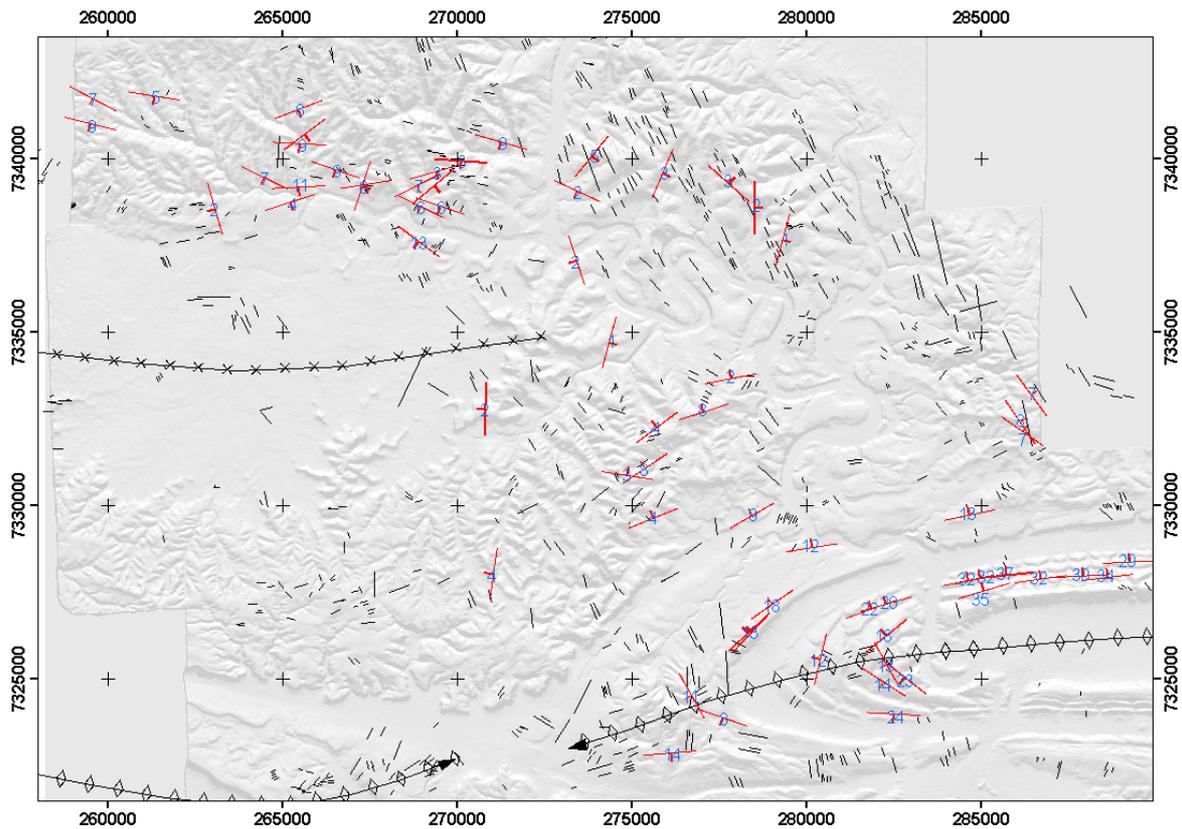


Abb. 8: Karte der digital ermittelten strukturgeologischen Elemente (Lineationen und Streichwerte). Zur besseren Anschauung wurde die Karte mit dem Relief des Untersuchungsgebietes unterlegt.

Im untersuchten Gebiet stellt die vorgestellte Methode der modifizierten Dreipunktmethode, auf der Basis abgeleiteter Höhenmodelle, einen hinreichend genauen Lösungsansatz zur kleinmaßstäblichen Erfassung tektonischer Grundstrukturen dar. Die Erstellung der Strukturkarte wie auch die Lineationskartierung liefern tolerierbare Werte (Abb. 8) und bieten eine gute Grundlage für strukturgeologische Analysen. Der hierbei auftretende Fehler liegt im Bereich der direkt im Gelände gemessenen Werte.

Literatur:

- BEEKMAN, F., STEPHENSON, R., A., & KORSCH, R., J., 1997: Mechanical stability of the Redbank Thrust Zone, central Australia: dynamic and rheological implications. – Australian Journal of Earth Sciences 44, S. 215-226.
- BERRY, M., D., STEARNS, D., W., & FRIEDMAN, M., 1996: The development of a fractured reservoir model for the Palm Valley Gas Field. APPEA Journal.
- BUDE, S., 2002: Untersuchung zur Geologie und Tektonik im Amadeus Basin (Australien) auf der Grundlage von multispektralen Fernerkundungsdaten. - Diplomarbeit Münster GPI.
- CARTWRIGHT, I., BUICK, I., S., FOSTER, D., A., & LAMBERT, D., D., 1999: Alice Springs age shear zones from the southeastern Reynolds Range, central Australia. – Australian Journal of Earth Sciences 46, S. 355-363.
- COOK, P., J., 1968: 1:250000 Geological Series-Explanatory Notes Henbury, N.T. Sheet SG/53-1 International Index. Bureau of Mineral Research, Geology and Geophysics, Canberra.

- FLÖTMANN, T., & HAND, M., 1999: Folded basement-cored tectonic wedges along the northern edge of the Amadeus Basin, Central Australia: evaluation of orogenic shortening. *Journal of Structural Geology* 21. 399-412.
- HAND, M., & SANDIFORD, M., 1999: Intraplate deformation in central Australia, the link between subsidence and fault reactivation. – *Tectonophysics* 305, S. 121-140.
- Imagine OrthoBASE users guide. *Erdas Imagine 8.6 Handbuch*, Leica Geosystems.
- WELLS, A. T., FORMAN, D. J., RANFORD, L. C., & COOK, P. J., 1970: *Geology of the Amadeus Basin central Australia*. – Bureau of Mineral Resources, Geology and Geophysics, Buttelin 100, Canberra.
- WOPFNER, H., 1997: *Geologie der Erde Band 4: Australien*. – Stuttgart, Enke.

Integration von ENVISAT-ASAR Daten in ein GIS-System zum Katastrophen-Monitoring im Rahmen des ENVISAT-Projektes [ID 142]

Ulrich Münzer¹, Kilian Scharrer¹, Klaus Weber-Diefenbach¹, Ágúst Gudmundsson²

Zusammenfassung: Aufgrund der seit 1992 am Department für Geo- und Umweltwissenschaften, Sektion Geologie der Ludwig-Maximilians-Universität München laufenden Forschungsprojekte mit der ESA, NASDA, CSA zum Katastrophen-Monitoring in Island kann nun im Rahmen des aktuellen ENVISAT-Projektes „Hazard Assessment and Prediction - Long-term Observation of Icelandic Volcanoes and Glaciers Using ENVISAT-ASAR and Other Radar Data“, ID 142, PI U. Münzer auf ein reichhaltiges Archiv multitemporaler SAR-Szenen sowie eine Vielzahl anderer geowissenschaftlicher Daten zurückgegriffen werden.

Damit ergibt sich die einmalige Chance die hochaktive Neovulkanzone Südislands über einen Zeitraum von mehr als 10 Jahren mit Methoden der Radarfernerkundung fortlaufend zu untersuchen und durch die Verschneidung mit diversen geowissenschaftlichen Datensätzen ein Frühwarnsystem zum Katastrophen-Monitoring aufzubauen.

1 Einführung

Island stellt aus mehreren Gründen ein ideales Untersuchungsgebiet zur Überwachung subglazialer Vulkane dar. Derzeit sind etwa 11 % der 103 000 km² großen Vulkaninsel im Nordatlantik von Gletschern bedeckt. Etwa 40 km² nehmen die kleinen Tal- und Kargletscher alpinen Typs von Tröllaskagi im Norden Islands ein. Der Hauptanteil der Eisflächen teilt sich jedoch unter den vier Plateaugletschern der Insel auf, d. h. dem Vatnajökull (8100 km²), dem Langjökull (953 km²), dem Hofsjökull (925 km²) und dem Mýrdalsjökull (596 km²) (MÜNZER et al. 2001). Die gewaltigen Eismassen dieser Plateaugletscher bedecken zahlreiche Vulkansysteme, bestehend aus Zentralvulkanen, linearen Kraterketten und Spaltenschwärmen. Bei allen isländischen subglazialen Vulkanausbrüchen ereignen sich neben den phreatischen Eruptionen verheerende Gletscherläufe (isl. Jökulhlaup). Sie werden durch die Wassermassen ausgelöst, die beim Schmelzen des auf dem Vulkan liegenden Eises entstehen. Solch ein Ereignis konnte in jüngster Zeit beim Ausbruch der subglazialen Vulkanspalte Gjálp (30. Sept. – 13. Okt. 1996) unter dem Vatnajökull und dem dadurch ausgelösten Gletscherlauf (5.-7. Nov. 1996) beobachtet werden. Während dieser zweitägigen Flutkatastrophe mit einem maximalen Abfluss von 53 000 m³/s und einer Abflusssumme von ca. 3,4 km³ wurde die Infrastruktur (Straßen, Brücken, Dämme, Stromleitungen, Telefonkabel, etc.) im Skeidarársandur erheblich beschädigt (SNORRASON, JÓNSSON, PÁLSSON, et al. 1997).

Die Entstehungsgeschichte Islands und die Bewegungsvorgänge seiner Strukturen sind eng mit der Bildung des Nordatlantiks bzw. dem Prozess der Kontinentaldrift verbunden.

Island ist der zentrale Bereich des aseismischen Island-Färö-Rückens und liegt am modellhaft symmetrischen Reykjanes-Segment des Mittelatlantischen Rückens (EISBACHER 1996). Die

¹ Dr. Ulrich Münzer, Department für Geo- und Umweltwissenschaften, Sektion Geologie, Ludwig-Maximilians-Universität München, Luisenstr. 37, 80333 München, e-mail: ulrich.muenzer@iaag.geo.uni-muenchen.de

¹ Dipl. Geogr. Kilian Scharrer, e-mail: k.scharrer@iaag.geo.uni-muenchen.de

¹ Prof. Dr. Klaus Weber-Diefenbach, e-mail: klaus.diefenbach@iaag.geo.uni-muenchen.de

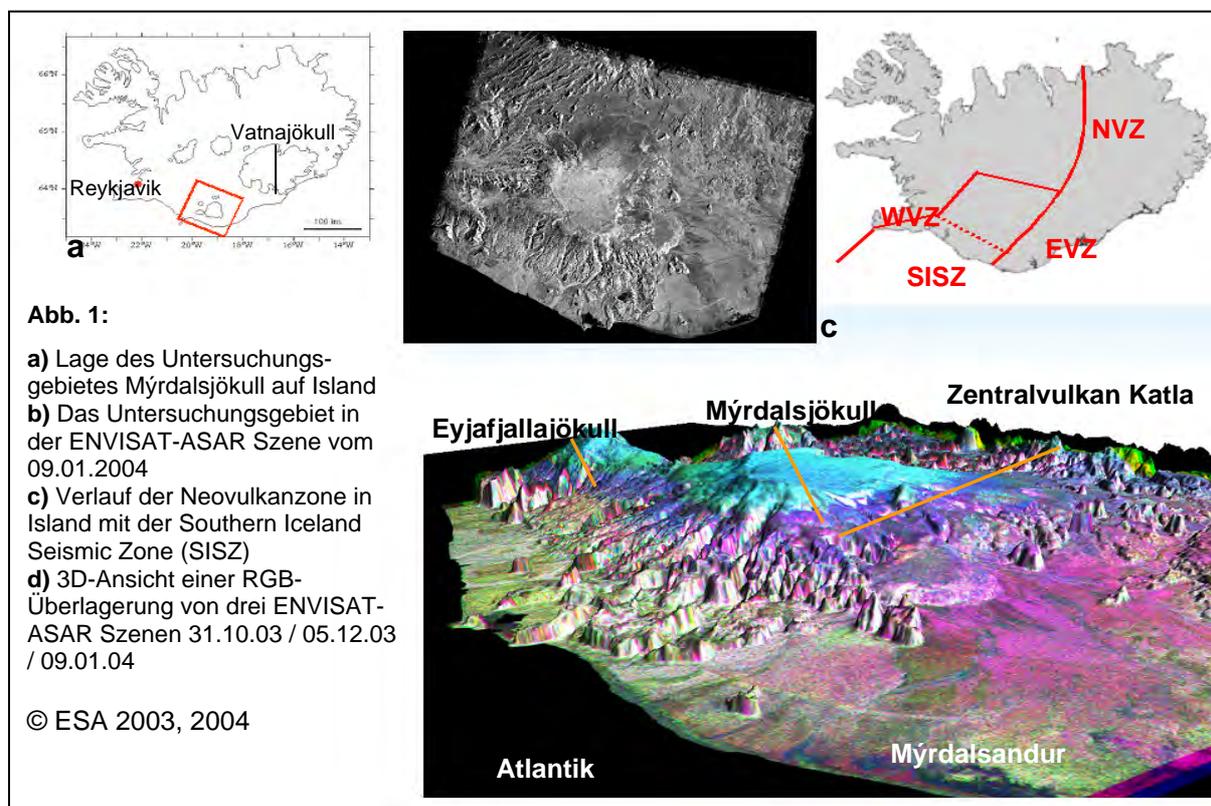
² Ágúst Gudmundsson, Fjarkönnun ehf, Furugrund 46, 200 Kopavógur, Island, e-mail: fjarkonn@simnet.is

Neovulkanzone (NVZ) wird durch zwei aktive Transformstörungen lateral begrenzt. Die Halbraten der Extension betragen im Bereich der NVZ ca. 1,7 cm/a, in den angrenzenden Riftsegmenten des Mittelatlantischen Rückens ca. 1 cm/a (IVARSSON 1992).

Die topographische Erhebung der ca. 103.000 km² großen Insel über die normale Tiefenlage dieses Rückens ist auf die Kombination eines Hot Spots mit der konvektiven Aufstiegszone des mittelatlantischen Rückens zurückzuführen (JAKOBSSON 1979). Dadurch wurde die magmatische Tätigkeit verstärkt und das Volumen an extrudierten Laven wesentlich erhöht. Gegenüber den recht einförmigen tholeiitischen mittelozeanischen Deckenbasalten zeichnet sich der über dem Meeresspiegel gelegene Festlandanteil Islands durch eine größere Varietät an Gesteinstypen aus. 80-85% der Gesteine sind Tholeiite, Übergangs-Alkalibasalte, Alkalibasalte und andesitische Basalte, ca. 10% besitzen einen sauren bis intermediären Chemismus und die Anteile der Sedimente vulkanischen Ursprungs betragen etwa 5-10% (SÆMUNDSSON 1979). Generell können drei stratigraphische Gruppen unterschieden werden. Die ältesten, tertiären Basalte (max. 16 Mio Jahre) liegen entsprechend dem Extensionsprozeß am weitesten von der Rückenachse entfernt im Nordwesten, Norden und Osten des Landes. Im Zentrum der Insel ist die vulkanisch aktive Riftzone (neovulkanische Zone) durch jungpleistozäne bis rezente Gesteine charakterisiert.

Die Riftzone durchquert Südisland mit 2 nahezu parallel versetzten Ästen (westliche und östliche Neovulkanzone, verbunden durch die „Suðurland Fracture Zone“ in NW-SE-Richtung), vereinigt sich im Zentrum des Landes und setzt sich S-N streichend bis zur Atlantikküste Nordislands fort.

Die neovulkanische Zone nimmt mit rund 35.000 km² etwa ein Drittel des Landes ein. Seit dem Ende der letzten Eiszeit waren schätzungsweise 200 Vulkane aktiv mit einer Magmenförderung von 400-500 km³. Allein seit der Besiedlung des Landes vor etwa 1100 Jahren wurden ca. 40 km³ Lava aus etwa 30 Vulkansystemen gefördert (SÆMUNDSSON 1979, KRAFFT 1984). Somit ist Island die größte Vulkaninsel der Erde.



2 Untersuchungsgebiet Mýrdalsjökull

Die neuesten Untersuchungen im Rahmen des ENVISAT-Projekts (ID 142) konzentrieren sich auf das Testgebiet Mýrdalsjökull (596 km²). Der Mýrdalsjökull ist der viertgrößte Gletscher der Insel. Seine südlichen Ausläufer sind nur wenige Kilometer von der Südküste Islands entfernt. Durch die ozeannahe Lage im Süden und dem Einfluss des Golfstroms erhält der Mýrdalsjökull starke Winterniederschläge und weist im Sommer hohe Abschmelzraten auf (BJÖRNSSON et al. 2000). Er lässt sich glazialmorphologisch in drei Bereiche unterteilen. Im Zentrum des Gletschers befindet sich ein ca. 130 km² großes Eisplateau mit den Eiskuppen Godabunga im NW (1480 m NN) und der Háabunga im Süden (1450 m NN). Nördlich davon erstreckt sich das ca. 140 km² große, fächerförmige Eisschild des Slettjökull, dessen Stirnfront bis auf 820-625 m NN reicht. Als dritte Einheit schließen sich um das zentrale Plateau nach Süden, Osten und Westen steil abfallende Auslassgletscher an, deren Loben bis in Höhen von ca. 100 m NN hinabreichen. Die Auslassgletscher, die eine Verbindung zum zentralen Eisplateau besitzen, weisen eine sehr hohe Dynamik auf. Hervorzuheben sind im NW der Entujökull, im SW der Sólheimajökull (letzter Gletscherlauf 18.07.1999) und im SE der Kötlujökull.

Die Eismächtigkeit des Mýrdalsjökull wurde mit Hilfe von Radio Echo Sounding bestimmt (BJÖRNSSON et al. 2000). Die mächtigste Eisaufgabe befindet sich somit im nördlichen Teil der Katla-Caldera, wo ein Bereich von 12 km² mehr als 600 m dickes Eis aufweist. Hier befindet sich auch das Maximum des gesamten Gletschers mit einer Dicke von 740 m. Nach BJÖRNSSON et al. (2000) beträgt das gesamte Eisvolumen am Mýrdalsjökull 140 km³, ca. 45 km³ liegen derzeit innerhalb der Caldera des Zentralvulkans Katla.

Erhöhte seismische Aktivität kennzeichnet derzeit das Untersuchungsgebiet (im Jahr 2000 Bebenanzahl 672, 2001 Bebenanzahl 405, 2002 Bebenanzahl 1803, 2003 Bebenanzahl 1333, > 1,0 auf der Richter-Skala).

Auf dem Kreuzungspunkt zwischen dem östlichen Ast der NVZ und der Southern Iceland Seismic Zone (SISZ) liegt unter dem Eis des Mýrdalsjökull der Zentralvulkan Katla. Eine ca. 100 km² große, subglaziale Caldera ist deutlich auf allen SAR-Daten zu erkennen. Darüber hinaus wird das Katla-Vulkansystem von dem südwestlichen Ausläufer des ca. 80 km langen Eldgjá-Háalda-Spaltenschwarms angeschnitten. Auf Grund der Eruptionszyklen (längste Ruhephase 80 Jahre, kürzeste 13) sowie einem enormen Anstieg der seismischen Aktivität ab dem Jahr 2000 ist am Mýrdalsjökull mit einem erneuten Vulkanausbruch zu rechnen. Die dort bislang aufgetretenen subglazialen Eruptionen hatten in den Jahren 1625, 1660, 1721, 1755, 1823, 1880 und zuletzt 1918 katastrophale Auswirkungen zur Folge (LARSEN 2000). So betrug 1918 der maximale Abfluss des Gletscherlaufes im Mýrdalssandur ca. 300.000 m³/s (BJÖRNSSON 1992). Weitere Aktivitäten waren im Jahr 1955, sowie ein kleiner Gletscherlauf 1999 am Sólheimajökull. Anhand der laufenden Untersuchungen wird mit einem baldigen subglazialen Vulkanausbruch der Katla mit verheerenden Gletscherläufen gerechnet.

3 Aufbau eines Geoinformationssystems (GIS)

Betrachtet man die vier wichtigsten Vorläufer von Vulkaneruptionen, d.h. Erdbeben, Aufwölbung, verstärkte Entgasung und Aufheizung (SCHMINCKE 2000), so wird deutlich, dass nur ein Teil dieser Daten aus Fernerkundungsdaten abgeleitet werden kann. Im speziellen Fall von subglazialen Eruptionen lassen sich Daten wie Erdbebentätigkeit und der Chemismus der Gletscherabflüsse nur vor Ort bestimmen. Dagegen können aus den SAR-Daten Deformationen der Eisoberfläche –bedingt durch die Plastizität des Eises- frühzeitig

detektiert werden und erlauben so Rückschlüsse auf Änderungen des Wärmegradienten im Bereich des Katla Vulkansystems. Im Rahmen des ERS-2-Projektes (AO2 D116) zeigte sich, dass sich der Verlauf der Gjalp-Eruptionsspalte (Vulkanausbruch 1996 am Vatnajökull) bereits einen Tag vor ihrem Durchbruch durch die ca. 400 m mächtige Eisdecke des Gletschers in nahezu voller Länge in den SAR-Szenen durchpauste (MÜNZER 2000).

Somit wird deutlich, dass ein effektives System zur Überwachung subglazialer Eruptionen und deren Auswirkungen nur durch eine Kombination fortlaufender ENVISAT-Aufzeichnungen mit zusätzlichen geowissenschaftlichen Daten (s. Abb. 2) erreicht werden kann. Hierfür ist ein geologisch-fernerkundlich ausgerichtetes Geographisches Informationssystem (GIS) bestens geeignet, da die Verknüpfung von Fernerkundungsdaten mit anderen raumbezogenen Datenquellen in vielerlei Hinsicht von Nutzen ist. Zum einen können die aus den Bilddaten abgeleiteten Auswertungsergebnisse mit den anderen Datenebenen verglichen werden und so zu aussagekräftigen, erweiterten und neuen Ergebnissen führen. Zum anderen unterstützen die diversen geowissenschaftlichen Zusatzinformationen die Interpretation der Fernerkundungsdaten, da man verschiedene Kriterien vorab in die Auswertung mit einbeziehen kann. Darüber hinaus bleibt das GIS durch die Einbindung der ENVISAT-Daten stets auf einem aktuellen Stand, da durch die verschiedenen Aufnahmemodi theoretisch alle 10 Tage neue Daten integriert werden könnten.

Der Datenbestand des im Rahmen des ENVISAT-Projekt erstellten Geoinformationssystems ist derzeit in 15 einzelne Datenebenen aufgeteilt, die durch ein einheitliches Bezugssystem miteinander verglichen und verknüpft werden können (s. Abb. 2).

Grundsätzlich wurde versucht so viele Informationsebenen wie möglich in der GIS-Datenbank abzulegen, um die Verschneidung und Überlagerung multidimensionaler und –temporaler Datenquellen zu ermöglichen.

Hervorzuheben ist die große Vielfalt der Datensätze. Beispielsweise ist das umfassende SAR-Datenarchiv zu erwähnen, das den Zeitraum der letzten 10 Jahre umfasst und somit im Rahmen eines Langzeit-Monitorings Unterschiede und Veränderungen der Eisstrukturen des Mýrdalsjökull detektierbar sind. Eine schnelle Zuschaltung neuester ASAR-Daten und deren Interpretationen ist möglich. Bisher sind die Aufnahmen folgender Radarsatelliten integriert:

Sensor	Wellenlänge	Anzahl	Zeitraum
JERS-1/SAR	L-Band	6	1994 - 1998
ERS-1/2	C-Band	12	1995 - 2000
RADARSAT	C-Band	1	1999
ENVISAT	C-Band	14	2002 – Mai 2004

Tab. 1: In das Geoinformationssystem integrierte SAR-Daten

Im Rahmen der internationalen Zusammenarbeit werden vom Icelandic Meteorological Office, Reykjavík, Erdbebenaufzeichnungen des SIL-Projektes (Southern Iceland Lowland) bereitgestellt (JAKOBSDOTTIR, GUDMUNDSSON & STEFÁNSSON 2002).

Die Daten können für das GIS online abgerufen werden, so dass täglich aktuellste seismische Ereignisse eingebaut werden können. Die Erdbebendaten geben Auskunft über Datum und Uhrzeit, Lage des Epizentrums mit X,Y und Z Koordinaten, sowie eine Fehlerabschätzung für die jeweilige Richtung und die Erdbebenstärke (Richter-Skala). Die Datenbank umfasst mittlerweile 5837 Erdbebenereignisse zwischen 1994 und 2004 (Stand: Mai 2004) mit einer Magnitude > 1,0 auf der Richter-Skala.

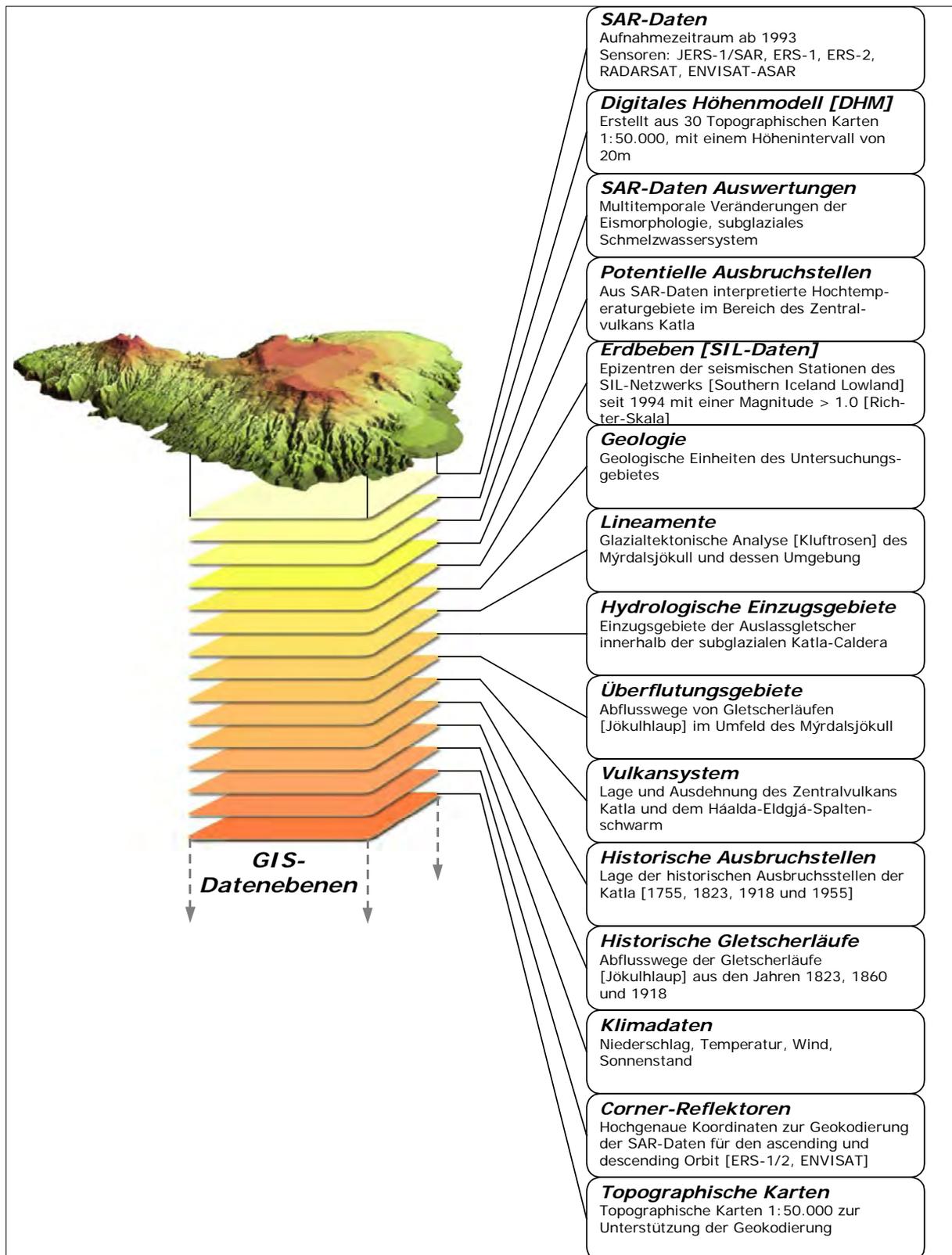


Abb. 2: Datenebenen des Geoinformationssystems für das Katastrophen-Monitoring am Myrdalsjökull

4 SAR-Datenverarbeitung

Im Rahmen des ENVISAT-Projekts, wird ein großes Kontingent an ASAR-Daten zur Verfügung gestellt, um ein kontinuierliches Monitoring am subglazialen Zentralvulkan Katla, den Eisbereichen des Mýrdalsjökull und den gefährdeten Randgebieten (Mýrdalssandur, Thórsmörk-Markarfljot und Südküste) durchführen zu können.

Für dieses Projekt wurde aus den diversen Konfigurationsmöglichkeiten der ASAR-Antenne, die Aufzeichnungsparameter so ausgewählt, dass zum einen eine Kontinuität zu den älteren ERS-1/2 Daten mit einem Einfallswinkel von $21,5^\circ$ (identisch ENVISAT-ASAR Mode IS2) besteht. Zum anderen wurde wegen der starken Reliefunterschiede im Testgebiet auf ASAR-Szenen des Antennenschwad IS5 mit einem Einfallswinkel von $37,5^\circ$ zurückgegriffen.

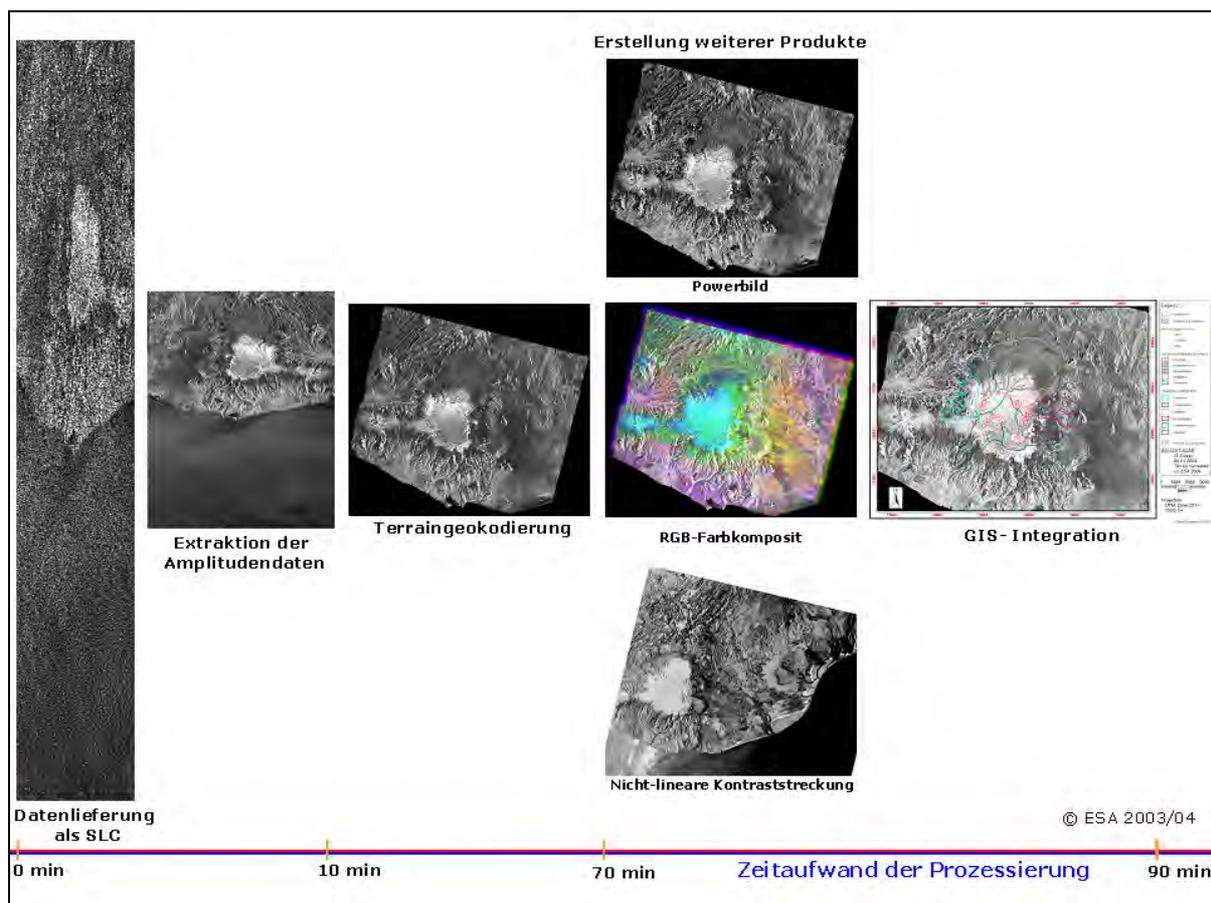


Abb. 3: Die Datenverarbeitungskette

Um möglichst vielseitige Untersuchungen mit den ASAR-Daten durchführen zu können, werden im Rahmen des Projektes alle ENVISAT-Szenen als Single Look Complex Daten [SLC] bezogen. Die Single Look Complex Daten sind 1-look prozessiert und liegen in Slant Range-Geometrie vor. Sie werden in komplexem Zahlenformat, nach Real- und Imaginärteil des Signals getrennt, geliefert. Vorteil der SLC-Produkte ist, dass die Phaseninformation, im Gegensatz zu den ASA_IMG_1P-Daten (ASAR image mode ellipsoid geocoded image), mit vorhanden ist. Dies ist eine notwendige Voraussetzung, um zusätzlich interferometrische Verarbeitungen durchführen zu können.

Die SLC-Daten erlauben ebenfalls eine Extraktion der Amplitudeninformation, als wichtigen ersten Schritt für die aufgebaute Datenverarbeitungskette. Dabei wird gleichzeitig eine Multi-Look-Prozessierung durchgeführt. Die Daten sind dann in Ground Range-Geometrie überführt (s. Abb 3). Beeinträchtigt durch die spezielle Aufnahmecharakteristik der SAR-

Systeme und dem Einfluss der Topographie (Layover, Foreshortening, Shadow), muss ein parametrisches Entzerrungsverfahren angewendet werden, bei dem neben kartographischen Abbildungsgleichungen auch sensorspezifische Abbildungsmodelle in die Korrektur eingehen (MEIER 1989). Die besten Ergebnisse werden erreicht unter Einbindung eines genauen digitalen Höhenmodells (Höhenintervall 20 m) mit identischer räumlicher Auflösung der zu korrigierenden SAR-Daten.

Zur Berechnung der Transformationsparameter müssen die geometrischen Beziehungen zwischen dem Bild und der Geländeoberfläche mittels Passpunkten hergestellt werden (ALBERTZ 2001). Die Auffindung von Passpunkten aus topographischen Karten ist schwierig. Daher wurden im Gebiet Mýrdalsjökull im Rahmen des ESA-Projektes AO2.D116 insgesamt zehn, eigens entwickelte Corner-Reflektoren (5 ascending und 5 descending) installiert (MÜNZER 2000). Die spezielle Geometrie, sowie die sorgfältig ausgewählte Position der Reflektoren in Bereichen geringer Oberflächenrauigkeit führen zu sehr hohen Rückstreuwerten in den Radarbildern. Da ENVISAT die gleiche Flugbahn wie die ERS-Satelliten besitzt, können die 1995 und 1998 installierten Reflektoren projektübergreifend verwendet werden. Dies ist selbst bei den ASAR-Szenen, Mode IS5 (37,5°) der Fall. Unter zu Hilfenahme weiterer 5 Passpunkte aus den digital vorliegenden topographischen Karten (1:50 000) und Einbindung eines DHM über die gesamte SAR-Szene werden nach der Terraingekodierung mit den Corner-Reflektoren sehr hohe Lagegenauigkeiten mit maximaler Abweichung von 1-2 Pixel erreicht.



Abb. 4: **a)** Rückstreuwerte am Corner-Reflektor M4 desc, ENVISAT-ASAR, vom 27.07.2003
b) Corner-Reflektor aus dem Untersuchungsgebiet mit Schneebedeckung
c) Rückstreuwerte am Corner-Reflektor M4 desc, ENVISAT-ASAR, vom 09.01.2004

Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass jedoch in den meisten Winterszenen, aufgrund der enormen Schneebedeckung, nicht auf die Corner-Reflektoren zur Passpunktbestimmung zurückgegriffen werden kann. Der Zeitaufwand für die Geokodierung erhöht sich durch eine erheblich größere Anzahl von Passpunkten (mindestens 30), die mit geringerer Genauigkeit nur aus den topographischen Karten bestimmt werden können, um den Faktor 8-10.

Die weitere Verarbeitung der Daten zielt darauf ab, einen möglichst hohen Informationsgehalt an Strukturen in den Gletscherbereichen des Untersuchungsgebietes zu erhalten. Dafür werden die Amplitudendaten noch einer Kombination verschiedener LEE-Sigma-Filter (Gradientenmaske 3x3, Multiplikationsfaktor 0,5) unterzogen, um das Speckle-Rauschen zu unterdrücken (LEE 1983) und schließlich erfolgt eine nicht-lineare Streckung der Grauwerte zur Kontrastoptimierung.

Anschließend werden aus den einzelnen Szenen Powerbilder durch die Formel berechnet:

$$P \text{ [db]} = 10 \cdot \log_{10} (A^2)$$

A = Amplitude

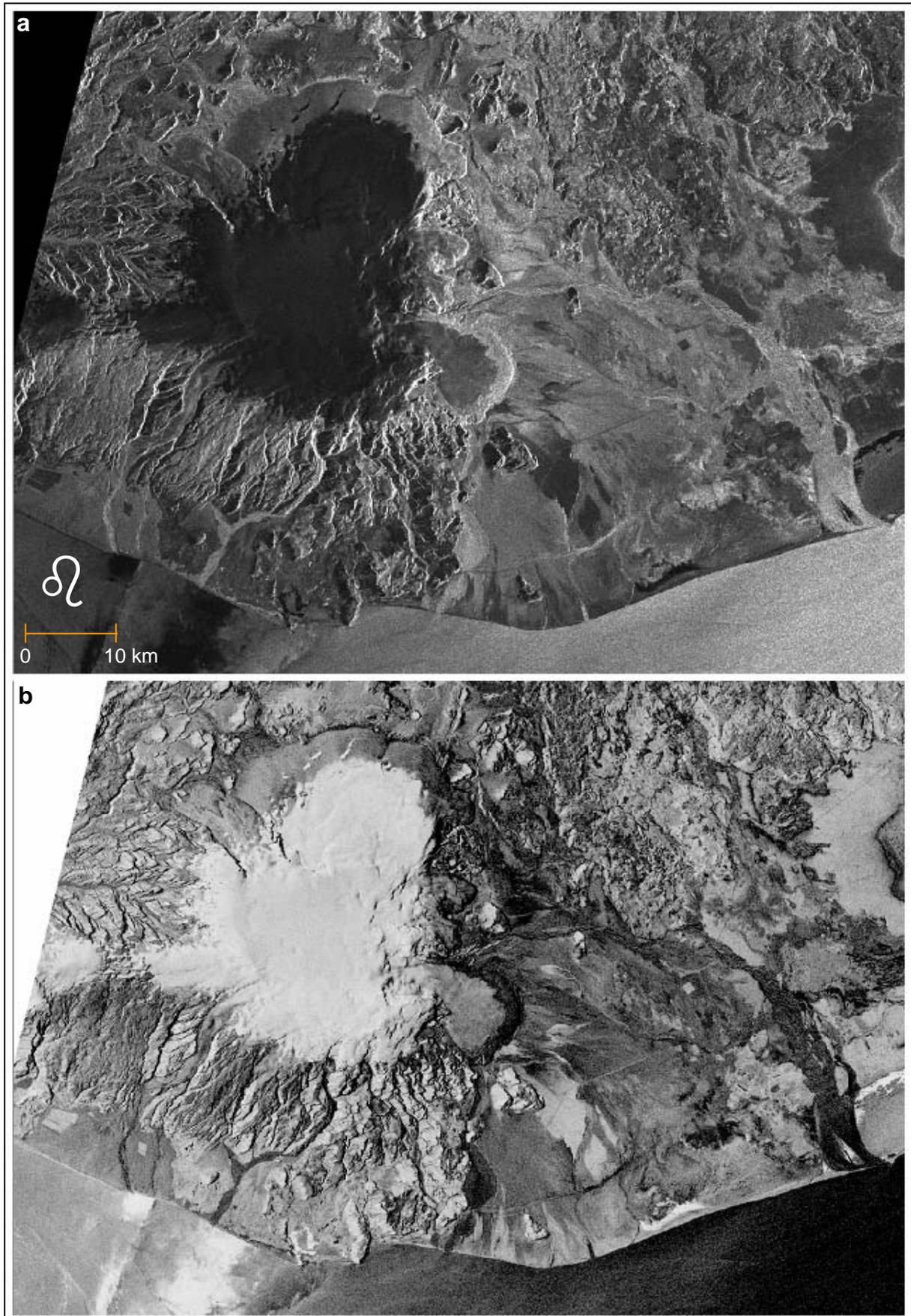


Abb. 5: a) Amplitudeninformation der ENVISAT-ASAR Subszene (ungefiltert) vom 27.07.2003
b) Kontrastgestrecktes Powerbild der gleichen Szene © ESA 2003

Es ergibt sich dadurch eine homogenere Grauwertverteilung und somit eine bessere Interpretation, nicht nur über die glazialen Bereiche des Mýrdalsjökull (Depressionen, Caldera, Lineamente, etc.), sondern auch im periglazialen Vorfeld (s. Abb. 5).

Eine weitere Steigerung des Informationsgehaltes wird durch die Überlagerungen ausgewählter SAR-Szenen als RGB-Farbkomposit erreicht. Hierfür werden die bereits terraineokodierten Szenen untereinander pixelgenau koregistriert, um die Lagefehler auszugleichen und Fehlinformationen auszuschalten.

Durch die kontinuierliche ENVISAT-Datenaufzeichnung ergibt sich die Möglichkeit mehrere Szenen des gleichen Track und Frames zu überlagern. Dadurch kann der zufällig verteilte Speckle-Effekt in den Daten reduziert werden, was die Detailerkennung erheblich steigert:

$$\text{SAR-Szene}_{[\text{Speckle-reduziert}]} = \frac{A_1 + A_2 + A_3 \dots + A_x}{\text{Anzahl der addierten Szenen}}$$

A_1, A_2, A_3, A_x = Amplitudeninformation zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten

Abschließend erfolgt die Einbindung der fertig prozessierten SAR-Produkte in das Geoinformationssystem. Die aufgebaute Datenverarbeitungskette unter Einbezug der Software ERDAS Imagine 8.7 und RSG (Remote sensing Software Graz) 4.60 sowie ArcView 3.3 ist für das Katastrophen-Monitoring sehr effizient. Innerhalb von 90 Minuten ist im günstigsten Fall die Integration von ENVISAT-ASAR oder anderen SAR-Daten (ERS-1/2) in das GIS möglich. Somit ist eine schnelle Risikoabschätzung für die betroffenen Regionen gegeben.

5 Ergebnisse

Generell haben die bisherigen Arbeiten gezeigt, dass anhand der vielen Datenebenen (15) im GIS schnell unterschiedliche „Katastrophen-Szenarien“ abgeleitet werden können, die durch die Ergänzung der neuen SAR-Szenen des ENVISAT, oder erweiterten Datenebenen wie z.B. Chemismus der Wässer, Abflussmengen, etc. immer aktuell sind.

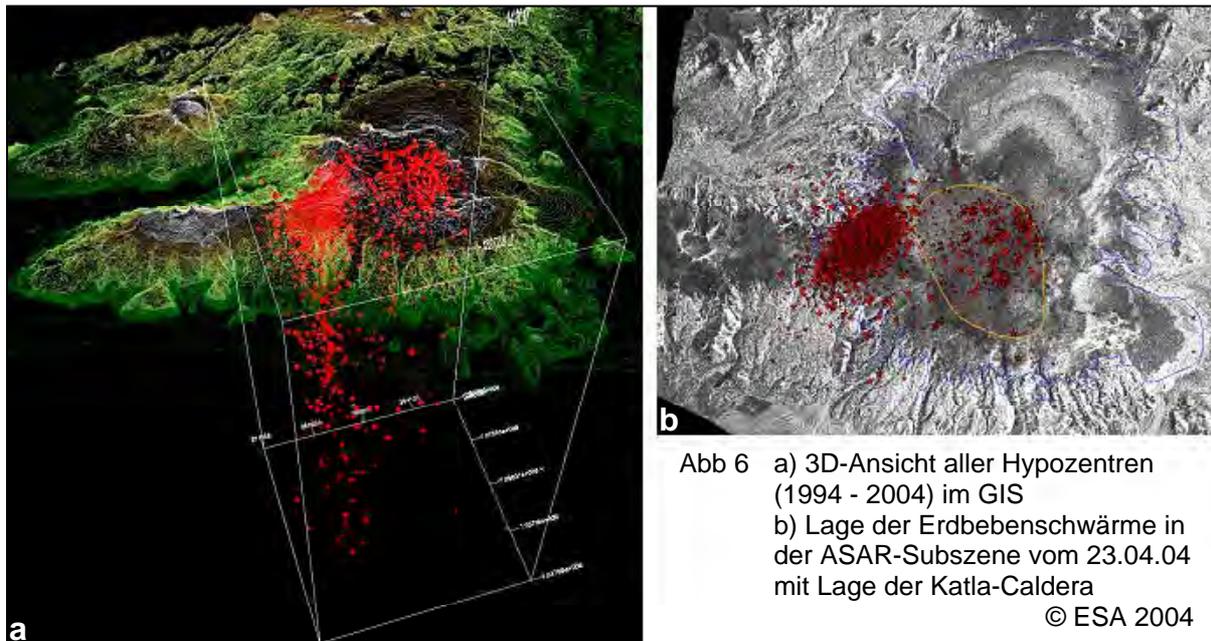
Die Auswertungen der 5837 Erdbebenereignisse ergeben einen signifikanten Anstieg der Aktivität, vor allem ab dem Jahr 2002. Die Epizentren der Beben sind eindeutig zwei voneinander getrennten Schwärmen zuzuordnen. Der westliche Schwarm liegt außerhalb der Caldera des Zentralvulkans Katla zwischen Mýrdals- und Eyjafjallajökull (s. Abb. 6). Die jahreszeitliche Verteilung innerhalb dieses Schwarms zeigt ein Maximum im Herbst und Winter. Die Epizentren des östlichen Schwarms befinden sich innerhalb der Katla-Caldera. Hier treten die Beben vor allem während der Sommermonate auf, was auf die geringere Auflast der Eisdecke durch die sommerliche Ablation und evtl. auf phreatomagmatische Prozesse durch das Einsickern von Schmelzwasser zurückzuführen ist.

Basierend auf dem Höhenmodell, erstellt aus 28 Kartenblättern der Topographischen Karte von Island (1:50000), wurden für die Eisbereiche des Mýrdalsjökull insgesamt sechs hydrologische Einzugsgebiete hypothetisch abgeleitet. Die Berechnung der Wasserscheiden erfolgte in Anlehnung an die Neigung und die Exposition der Eisflächen.

Bei einem erneuten Katla-Ausbruch ist vor allem deren Flächenanteil innerhalb der Caldera von Bedeutung. Etwa 58 km² der Caldera entwässern über den Auslassgletscher Kötlujökull, jeweils ca. 17 km² über den Sólheima- und den Entujökull, etwa 6 km² über den Sandfellsjökull und nur ca. 1 km² über den Slettjökull. Beim Vergleich der Einzugsgebiete

mit den Abflusswegen der Gletscherläufe bei historischen Ausbrüchen wird deutlich, dass die Abflussrichtungen korrekt wiedergegeben werden(s. Abb. 7).

Die über einen Zeitraum von knapp zehn Jahren vorliegenden SAR-Daten wurden hinsichtlich der Unterschiede und Veränderungen der Eisstrukturen interpretiert. Es zeigt sich, dass sich die SAR-Daten sehr gut für diese Fragestellung eignen. Aus allen Szenen konnten aussagekräftige Informationen abgeleitet werden. Festzuhalten ist, dass für ein Katastrophen-Monitoring unbedingt SAR-Daten eines aufsteigenden und eines absteigenden Orbits verwendet werden müssen.



Am 18. 07 1999 ereignete sich ein kleiner Gletscherlauf am Sólheimajökull, wobei der Zeitraum vor und nach dem Ereignis mit einer engen zeitlichen Abfolge von SAR-Daten abgedeckt ist. An diesem konkreten Fall zeigt sich, dass aus den SAR-Daten alleine keine eindeutige Aussage über den Ursprung des Gletscherlaufes abgeleitet werden kann. Durch die Überlagerung im GIS mit den hydrologischen Einzugsgebieten konnte die Anzahl der in Frage kommenden Eisdpressionen eingegrenzt werden. Der Abgleich mit den Erdbebendaten, sowie ein Größenvergleich der aus den SAR-Daten interpretierten Eiskessel vor und nach dem Gletscherlauf ermöglichten die Ableitung der wahrscheinlichen Ausbruchsstelle.

Bei der Überlagerung aller Auswertungsergebnisse der SAR-Szenen von 1994 bis Mai 2004 zeigte sich die Lage der morphologischen Strukturen nahezu unverändert. Die Regionen in denen subglaziale thermische Prozesse stattfinden sind als rundliche Strukturen, d.h. Depressionen über die gesamte Zeitspanne annähernd unverändert zu erkennen.

Die linearen Strukturen wurden als subglaziale Schmelzwassertunnel interpretiert, da ein Vergleich von Sommer- und Winteraufnahmen eine deutliche Reduktion der Tunnelsysteme in den Wintermonaten, infolge des niedrigeren Schmelzwasseraufkommens und der Verfüllung durch Schnee, zeigt. Alle subglazialen Abflussrinnen lassen sich bis zu einer Depression, d.h. einer Stelle geothermaler Aktivität zurückverfolgen. Insgesamt können für den Bereich der Katla-Caldera 20 geothermisch aktive Gebiete postuliert werden, wobei 16 innerhalb der Caldera liegen, 4 knapp außerhalb am nordöstlichen Rand (s. Abb. 7).

Der Vergleich der 20 punktuellen Geothermalausstritte mit den bekannten historischen Ausbruchsstellen von 1755, 1823, 1918 und 1955 zeigt eine stationäre Lage der „Hot Spots“,

weshalb davon auszugehen ist, dass ein baldiger Ausbruch innerhalb der Caldera an einer dieser 20 sensiblen Bereiche stattfinden wird. Eine exakte Zuordnung der Geothermalzentren und der Abflussrinnen zu den entsprechenden Einzugsgebieten ist möglich.

Dadurch ergibt sich die Möglichkeit größere Zusammenhänge im Hinblick auf künftige Gletscherläufe aufzuzeigen.

Auf der Basis der Untersuchungen konnten auch thematische Datenebenen im GIS abgeleitet werden, die eine Überlagerung und Verschneidung mit zukünftig aufgezeichneten SAR- und Erdbebendaten ermöglichen, wodurch eine Risikoeinschätzung bezüglich einer subglazialen Eruption, oder der von einem Gletscherlauf bedrohten Regionen, wesentlich schneller und präziser getroffen werden kann (s. Abb. 7). Ein großer Beitrag zu einem GIS-orientierten Frühwarnsystem ist somit gegeben.

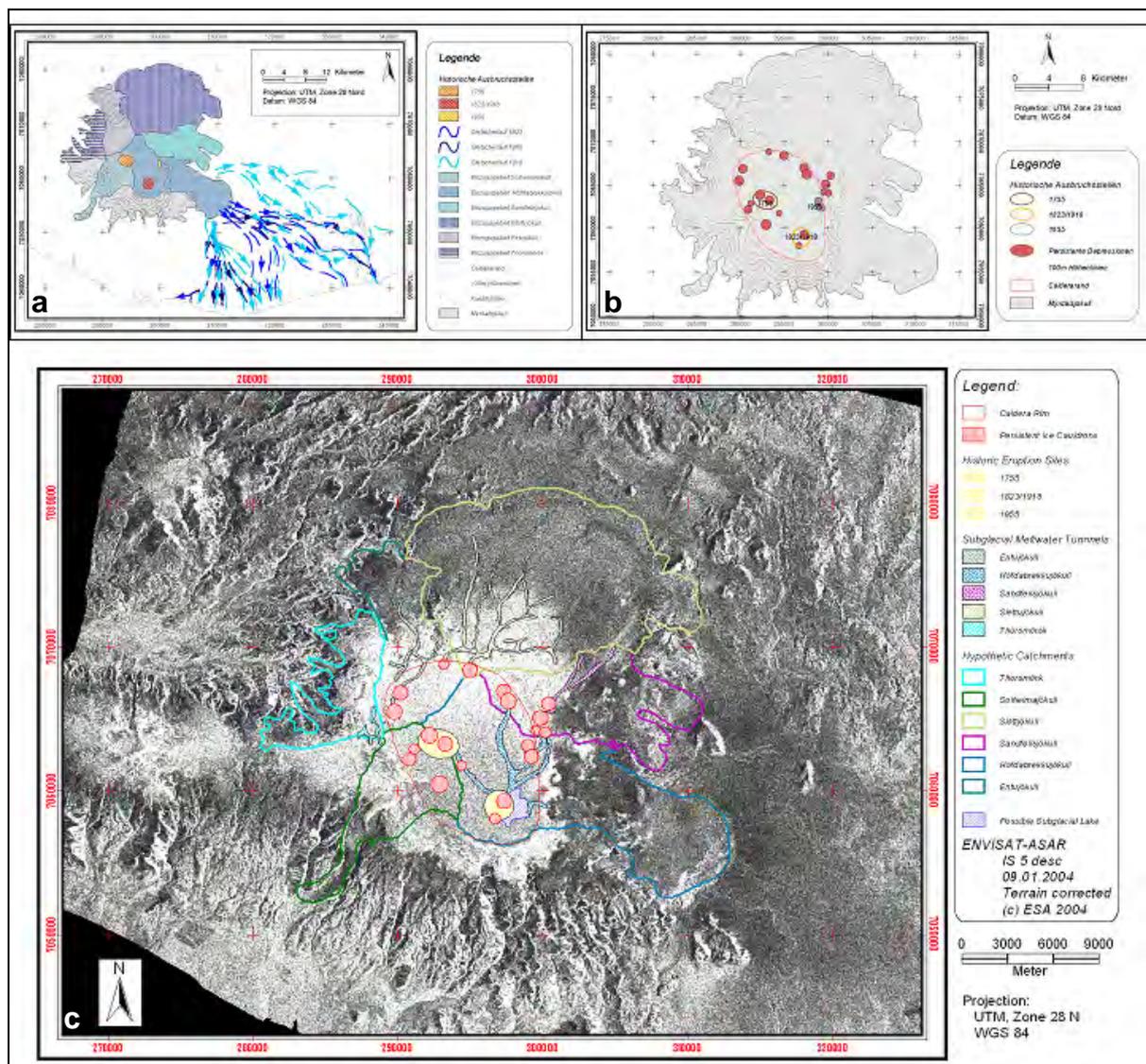


Abb 7 a) Hydrologische Einzugsgebiete, historische Ausbruchsstellen und Gletscherläufe
 b) Historische Ausbruchsstellen und rezente Eisdepressionen im Bereich der Katla-Caldera
 c) ENVISAT-Subszene vom 09.01.04, überlagert mit selektierten, thematischen Datenebenen
 © ESA 2004

6 Danksagung

Der ESA sei für die großzügige Bereitstellung des benötigten Datenmaterials im Rahmen des ENVISAT-Projektes (ID142) zum Katastrophen-Monitoring in Island gedankt.

Ein besonderer Dank geht an H. Rott und seine Mitarbeiter, Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck, für die gute, wissenschaftliche Zusammenarbeit, nicht nur in diesem Projekt.

Die Hilfe und Beratung zum Software Paket RSG, von J. Raggam und W. Hummelbrunner, Joanneum Research Center Graz, verdient besonderer Erwähnung.

Die Untersuchungen können mit Hilfe eines Doktorandenstipendiums der Bayerischen Forschungsförderung (Förderkennzeichen: DPA-37/04) durchgeführt werden.

Die Münchner Universitätsgesellschaft unterstützt durch einen Zuschuss die laufenden Geländearbeiten in Island. Beiden Institutionen sei ein herzlicher Dank ausgesprochen.

Dem Icelandic Meteorological Office (Vedurstofa), Reykjavík, sei für Bereitstellung der seismischen SIL-Daten für dieses Projekt gedankt, sowie dem Icelandic Research Council (RANNIS), Reykjavík, für die Genehmigung der wissenschaftlichen Arbeiten in Island (Declaration Nr. 8/2004)

7 Literaturverzeichnis

- ALBERTZ, J. (2001): Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. 2. Auflage. Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Darmstadt.
- BJÖRNSSON, H.; PÁLSSON, F. & GUDMUNDSSON, M. T. (2000): Surface and bedrock topography of the Mýrdalsjökull ice cap, Iceland: The Katla caldera, eruption sites and routes of jökulhlaups.- Jökull, 49: 29-46. Reykjavik.
- EINARSSON, P. & BRANDSDÓTTIR, B. (2000): Earthquakes in the Mýrdalsjökull area, Iceland, 1978-1985: Seasonal correlation and connection with volcanoes.- Jökull, 49: 59-74. Reykjavik.
- EISBACHER, G. H. (1996): Einführung in die Tektonik.- VIII. Stuttgart.
- HENDERSON, F. M.; LEWIS, A. J. (Eds.) (1998): Principles and Application of Imaging Radar. Manual of Remote Sensing. 3rd Edition, Volume 2. John Wiley & Sons. USA.
- IVARSSON, G. (1992): Geology and Petrochemistry of the Torfajökull Central Volcano in Central South Iceland, in Association with the Icelandic Hot Spot and Rift Zones.- Diss. Univ. Hawaii. Honolulu.
- JAKOBSDÓTTIR, S. S.; GUDMUNDSSON, G. B. & STEFÁNSSON, R. (2002): Seismicity in Iceland 1991-2000 monitored by the SIL seismic system.- Jökull, 51: 87-94. Reykjavik.
- JAKOBSSON, S. P. (1979): Outline of the Petrology of Iceland.- Jökull, 29: 57-73. Reykjavik.
- KRAFFT, M. (1984): Führer zu den Vulkanen Europas Band 1: Allgemeines – Island. – Stuttgart (Enke).
- LARSEN, G. (2000): Holocene eruptions within the Katla volcanic system, south Iceland: Characteristics and environmental impact.- Jökull, 49: 1-28. Reykjavik.
- LEE, J. S. (1983): Speckle Analysis and Smoothing of Synthetic Aperture Radar Images.- Computer Graphics and Image Processing, 17: 24-32.
- MEIER, E. (1989): Geometrische Korrektur von Bildern orbitgestützter SAR-Systeme.- Remote Sensing Series, Vol. 15, Geographisches Institut, Universität Zürich.

- MÜNZER, U.; BAHR, T.; WEBER.DIEFENBACH, K. (2000): Katastrophen-Monitoring am Beispiel Islands. Schlußbericht Förderkennzeichen 50 EE 9706. 62 S. München.
- MÜNZER, U.; GUDMUNDSSON, Á.; WEBER.DIEFENBACH, K. (2001): Überwachung subglazialer Vulkane auf Island mit geowissenschaftlichen und fernerkundlichen Methoden.- ALBERTZ, J. (Hrsg.): Rauminformation für das 21. Jahrhundert.- Publ. Dt. Ges. Photogrammetrie Fernerkundung, 9. Berlin.
- MÜNZER, U. & WEBER-DIEFENBACH, K. (2003): Remote Sensing of Subglacial Eruptions in Iceland and Development of Related Warning Systems.– Proceedings „International Conference on Early Warning Systems for the Reduction of Natural Disasters“ (EWC '98), Potsdam, 07.-11.09.98: 515-520. Springer. Berlin.
- PARESCHI, M. T., CAVARRA, L., FAVALLI, M., GIANNINI, F. & MERIGGI, A. (2000): GIS and Volcanic Risk Management.- *Natural Hazards*, 21: 361-379.
- ROTT, H., MAYER, C. & FISCHER, A. (2001): The application of ERS SAR interferometry for the assessment of hazards related to slope motion and subglacial volcanism. Proc. of ERS-ENVISAT Symposium, Gothenburg, Sweden, 16-20 Oct 2000. ESA SP-461, CD-ROM, ISBN 92-9092-685-6, Paper ID: 234, 12 S.
- ROTT, H.; STURM, K. & MILLER, H. (1993): Active and passive microwave signatures of Antarctica firn by means of field measurements and satellite data.- *Ann. Glaciol.*, 17: 337-343.
- SAEMUNDSSON, K. (1979): Outline of the Geology of Iceland.- *Jökull*, 29: 7-28. Reykjavik.
- SCHMINCKE, H.-U. (2000): Vulkanismus. 2. Auflage. Wissenschaftliche Buchgesellschaft. Darmstadt.
- SKIDMORE, A. (Ed.) (2002): Environmental Modelling with GIS and Remote Sensing. Taylor & Francis. London.
- SNORRASON, Á.; JÓNSSON, P.; PÁLSSON, S.; ÁRNASON, S.; SIGURDSSON, O.; VÍKINGSSON, S.; SIGURDSSON, Á.; ZÓPHONIASSON, S. (1997): Hlaupið á Skeiðarásandi Haustið 1996. Útbreiðsla, Rennsli og Aurburður.- VEGAGERDIN (Hrsg.): Vatnajökull. Gos og Hlaup 1996: 79-137. Reykjavik.

Der Einfluss von Geogasemissionen an der Erdoberfläche auf die thermale Signatur der Austrittsstelle - Untersuchungen mit einem Wärmebildgerät an künstlichen Mofetten

SAMUEL MONET¹, VOLKER TANK²

Zusammenfassung: Geodynamische Prozesse, sowie Lagerstätten fossiler Kohlenwasserstoffe sind Ursache von Ausgasungen an der Erdoberfläche. Ihre Lokalisierung und die Überwachung der Gasflüsse sind u. a. von Interesse für das Verständnis der zugrunde liegenden geophysikalischen Prozesse. Auf dem Weg zur Erdoberfläche kommt es zu einer thermischen Wechselwirkung zwischen Gas und durchströmtem Gestein/Erdreich. An der Oberfläche wirken verschiedene thermische Einflüsse, wie Sonne, Wind und Wetter, an den Austrittsstellen wirkt zusätzlich das Gas. Im Experiment wird eine Mofette durch die Einleitung von Druckluft in die Erde simuliert. Über längere Zeiträume wird die thermale Signatur der Szene mit einer Infrarotkamera aufgezeichnet. Auswerteverfahren werden für die Thermalbilder entwickelt, welche den thermischen Einfluss des Gases von den übrigen Einflüssen unterscheiden und die Mofette lokalisieren. Damit werden die Grundlagen für ein flugzeuggetragenes Fernerkundungssystem für Gasaustritte geschaffen.

1 Einleitung

In verschiedenen Regionen der Erde treten Gase (z. B. CO₂, SO₂, CH₄, etc.) an der Erdoberfläche aus. Unter anderem können diese ihren Ursprung in aktiven, magmatischen Reservoirs des Erdmantels (z. B. CO₂, SO₂, etc.) oder in Lagerstätten fossiler Kohlenwasserstoffe (z. B. CH₄) haben. Sie sind oft an seismische und vulkanische Aktivität geknüpft, oder sind als subvulkanische Erscheinungen von Mantelfluiden zu werten (BANKWITZ, KÄMPF, STÖRR & SCHNEIDER, 2001). Es besteht unter anderen aus zwei Gründen Interesse, die Gasaustritte zu erkennen und zu überwachen: einerseits spielen Gase in seismischen und vulkanischen Vorgängen eine große Rolle, zu deren wissenschaftlichem Verständnis die Kenntnis und Beobachtung aller Austritte beitragen kann. Andererseits können Veränderungen der Gasaustritte (Änderung des Gasflusses und/oder der Gaszusammensetzung) in Zusammenhang mit bevorstehenden Beben oder Ausbrüchen stehen und ihre Überwachung daher möglicherweise die vorhandenen Verfahren zur Frühwarnung ergänzen. Die Gasaustritte finden sich in der näheren und weiteren Umgebung geologisch markanter Strukturen, oder aber an den Flanken aktiver, ruhender oder erloschener Vulkane. Sie sind unterschiedlicher Natur: trockene Mofetten, Fumarolen, Wassermofetten, Mineralwässer. Insbesondere der Austritt über trockene Mofetten ist häufig diffus und daher schwer zu entdecken. Die bisher bekannten Austritte wurden durch Geländebegehung gefunden. Eine flächendeckende Erfassung und darüber hinaus die Überwachung von Veränderungen sind so nicht möglich. Dazu sind Verfahren zur großräumigen Suche mit Hilfe von Fernerkundungssystemen (z. B. von Luftfahrzeugen) notwendig. Diese könnten darüber hinaus auch für die Suche von Leckagen in Gasleitungen und von Erdöllagerstätten (austretendes Methan) geeignet sein.

¹ Samuel Monet, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Construction Aéronautique, ENSICA, rue Louis Planat 31000 Toulouse, e-mail: samuel.monet@laposte.net

² Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Volker Tank, Institut für Methodik der Fernerkundung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR, Oberpfaffenhofen, 82234 Weßling, e-mail: Volker.Tank@dlr.de

2 Das Detektionsprinzip

In den Experimenten wird untersucht, ob Gasaustritte an der Erdoberfläche einen messbaren thermischen Effekt verursachen, ob dieser zu ihrer Detektion mittels Fernerkundung durch Infrarot-Bildaufnehmer geeignet ist, welches dazu die besten Bedingungen und notwendigen Sensoreigenschaften sind, und ob aus dem gemessenen Effekt auf den Gasfluss geschlossen werden kann. Grundlage sind die nachstehenden Betrachtungen zum thermischen Verhalten natürlicher Bodenstrukturen und -oberflächen. Zunächst werden unbewachsene Bodenoberflächen betrachtet, für bewachsene Oberflächen gelten komplexere Zusammenhänge, die aber den gleichen Prinzipien folgen. Die Betrachtungen beschränken sich auf den Spektralbereich von ca. 8 bis 14 μm Wellenlänge und auf emittierte Infrarotstrahlung. Einerseits ist in diesem Spektralbereich das Maximum der Strahlungsemission für Objekte bei Umgebungstemperatur und andererseits ist der Reflexionsgrad natürlicher Objekte meist gering, die reflektierte Strahlung also vernachlässigbar. Der Boden emittiert Infrarotstrahlung weitaus überwiegend an der Grenzschicht zur Luft, deren Temperatur und Emissionsgrad sind also primär bestimmend für die messbare Strahlung. Die Temperatur der Grenzschicht unterliegt tages- und jahreszeitlich starken Schwankungen, die durch eine Reihe verschiedener Einflüsse verursacht werden, u. a. auch durch die Temperatur der Schichten unter der Oberfläche. Bezüglich des zeitlichen Verlaufs der Temperaturänderungen können drei Arten und Ursachen unterschieden werden:

1. die niedrigfrequenten, bedingt durch die Jahreszeiten und das Klima am Ort,
2. die mittelfrequenten, bedingt durch den Wechsel von Tag und Nacht,
3. die höchstfrequenten, statistischen, abhängig vom Wetter.

Bei letzteren sind es am Tage die direkte und indirekte Sonneneinstrahlung (Intensität und Dauer, bestimmt durch Sonnenstand, Dynamik der Bewölkung, sowie die Orientierung der Bodenfläche zur Sonne), die den größten Einfluss haben, bei Tag und Nacht zusätzlich Niederschläge und Wind. Alle Einflüsse und die bewirkten Temperaturänderungen überlagern sich. Die Grenzschichttemperaturen werden am stärksten vom Wetter beeinflusst und besonders, wenn dieses sehr wechselhaft ist (Wolken, Wind, Sonnenschein, schauerartige Niederschläge). Herausragend ist dabei der Einfluss von Sonnenschein in Zusammenhang mit ziehenden Wolken und die dadurch verursachten Wechsel von Licht und Schatten. Er bestimmt vorwiegend die zur Tageszeit auftretenden Temperaturwechsel der Bodenoberfläche.

Die Eigenschaften des Bodens selbst sind von Bedeutung. Das sind einerseits der spektrale Strahlungsabsorptionsgrad der Grenzschicht und deren Wärmeübergang zur Luft und zum Boden, andererseits die Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit des unter der Oberfläche liegenden Bodens, die Bodenfeuchte, etc.. Für weitgehend homogene Bodenflächen nicht zu großer Ausdehnung (einige zig Quadratmeter) und einheitlicher Topographie werden die Einflüsse überall nahezu gleich sein, mit der Folge, dass die auftretenden zeitlichen Temperaturverläufe der Flächen weitgehend gleich sind. Inhomogene Oberflächen, mit Steinen, abgefallenem Laub, Zweigen und Ästen (und dadurch z. B. auch beschatteten Bereichen) weisen bei Sonnenschein ausgeprägte örtliche Inhomogenitäten der Oberflächentemperatur auf. Stellen, an denen Gase aus der Erde treten, erfahren einen zusätzlichen Temperatureinfluss, der auf der übrigen Fläche fehlt. Betrachtet werden Gase, die aus großer Tiefe aufsteigen. Es wird davon ausgegangen, dass zu Beginn einer Beobachtung der Gasstrom so lange mit konstanten Parametern geströmt war, dass sich dadurch ein thermisches Gleichgewicht im System ausgebildet hat. Dieses wird nur im Bereich von ca. 10 m unter der Bodenoberfläche durch jahreszeitliche Schwankungen der Bodentemperatur beeinflusst, nicht aber über kürzere Zeiträume von wenigen Tagen. Die Gase treten daher mit einer konstanten Temperatur T_{GA} aus.

Die Oberflächentemperatur des Bodens im vom Gas thermisch beeinflussten Bereich sei T_{BG} , in der nicht mehr beeinflussten Umgebung des Austritts sei sie T_{BU} . Die Ausgangssituation ist folgende:

$$T_{GA} = \text{const},$$

T_{BU} ändert sich aufgrund äußerer Einflüsse (s. o.).

Gefragt ist, wie sich T_{BO} in Bezug auf T_{BU} einstellt. Das Gas hat vereinbarungsgemäß einen konstanten thermischen Einfluss. Alle anderen Einflüsse können in stark vereinfachter Darstellung durch drei Fälle beschrieben werden:

1. Die Temperaturen des austretenden Gases und die der Erdoberfläche in der Umgebung der Austrittsstelle sind gleich,

$$T_{BU}(1) = T_{GA}, \quad (1)$$

dann ist:

$$T_{BG}(1) = T_{BU}(1). \quad (2)$$

2. Der thermische Einfluss der Umwelt führt zu einer Temperaturerhöhung der Bodenoberfläche in Bezug auf die Temperatur des austretenden Gases:

$$T_{BU}(2) > T_{GA}, \quad (3)$$

dann wird:

$$T_{BG}(2) < T_{BU}(2). \quad (4)$$

3. Der thermische Einfluss der Umwelt führt zu einer Temperaturniedrigung in Bezug auf die Temperatur des austretenden Gases:

$$T_{BU}(3) < T_{GA}, \quad (5)$$

dann wird:

$$T_{BG}(3) > T_{BU}(3). \quad (6)$$

Daraus folgt für die Temperaturänderungen, die sich im Zusammenhang mit den sich ändernden thermischen Umwelteinflüssen an Gasaustritten und an Oberflächen ohne Gasaustritt beobachten lassen:

$$\Delta T_{BG}(1) = |T_{BG}(3) - T_{BG}(2)| < |T_{BU}(3) - T_{BU}(2)| = \Delta T_{BU}(1) \quad (7)$$

$$\Delta T_{BG}(2) = |T_{BG}(3) - T_{BG}(1)| < |T_{BU}(3) - T_{BU}(1)| = \Delta T_{BU}(2) \quad (8)$$

$$\Delta T_{BG}(3) = |T_{BG}(2) - T_{BG}(1)| < |T_{BU}(2) - T_{BU}(1)| = \Delta T_{BU}(3) \quad (9)$$

also:

$$\Delta T_{BG}(m) < \Delta T_{BU}(m), \quad (10)$$

mit m = laufende Nummer der Differenz zweier Messungen. Das heißt, umweltbedingte Temperaturänderungen wirken sich an der Stelle von Gasaustritten immer geringer aus als an anderen Stellen. Die austretenden Gase haben dämpfenden Einfluss auf die Änderungen der Oberflächentemperatur der Austrittsstelle; sie kühlen, wenn die Umgebung wärmer wird, sie heizen, wenn die Umgebung kälter wird. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, Gasaustritte mittels Beobachtung durch Wärmebildgeräte zu identifizieren. Einschränkend gilt, dass die praktische Anwendung des Prinzips nach (10) nur möglich ist, wenn der Effekt des Gases bezüglich der Temperatur und der Ausdehnung der beeinflussten Fläche eine ausreichende

Signifikanz erreicht. Das hängt einerseits von der geometrischen Struktur des Gasaustritts im Zusammenhang mit der austretenden Gasmenge ab: günstig sind viele kleine benachbarte Austrittsöffnungen, vergleichbar einem dreidimensionalen Flussdelta, und eine hohe Gasflussrate. Andererseits sind die thermischen Umwelteinflüsse bestimmend: andauernde starke Niederschläge werden den Effekt zum Verschwinden bringen. Dagegen wird ein darauf folgender Übergang zu trockenem, sonnigen Wetter die Detektion begünstigen.

3 Experimente

Es wurden bereits verschiedene kleinere Experimente mit dem Ziel durchgeführt, die prinzipielle Eignung des Verfahrens zu untersuchen (TANK, PFANZ, STROBL & GEMPERLEIN, 2004). Diese fanden sowohl an realen Mofetten im Egerbecken, als auch an einer künstlichen im Betriebsgelände des DLR in Oberpfaffenhofen statt. Dabei wurde jeweils mit einem Wärmebildgerät aus einigen Metern Entfernung die Temperaturverteilung der Erdoberfläche aufgenommen. Die Bildauswertung basierte auf dem oben beschriebenen Prinzip. Es konnte gezeigt werden, dass unter bestimmten Wettersituationen Gasaustritte eindeutig zu identifizieren sind. Es wurde aber auch die Komplexität des Problems insbesondere in bezüglich Textur und Bewuchs stark strukturierter Landschaft und angesichts der hohen Vielfalt und Variabilität des Wetters in unseren Breiten deutlich. Zur Durchführung systematischer Untersuchungen unter kontrollierten Bedingungen und über längere Zeiträume wurde am Institut für Methodik der Fernerkundung, DLR, Oberpfaffenhofen, eine künstliche Mofette eingerichtet. Ein Kunststoffschlauch wurde auf einer Freifläche (Wiese mit einigen Bäumen) zwei Meter tief im Erdboden vom Institutsgebäude ausgehend etwa 26 m weit ins Freie vergraben. Der Schlauch ist über einen einstellbaren Druckminderer an die hauseigene Druckluftversorgung im Gebäude angeschlossen. Das Ende des Schlauchs ist verschlossen, auf dem letzten Meter sind 5 äquidistante Bohrungen von jeweils 6 mm Durchmesser angebracht, um den Gasaustritt nicht punktuell, sondern verteilt erfolgen zu lassen. Parallel zur Gasleitung sind insgesamt 12 Temperaturfühler und ihre Zuleitungen verlegt und ebenfalls ins Institutsgebäude geführt. Auf dem Dach des Gebäudes in 11,5 m Höhe wurde eine Infrarotkamera installiert. Der Aufbau ist in Abb. 1 schematisch dargestellt. Die technischen Daten der Kamera und die geometrischen Parameter des Experimentaufbaus sind in Tab. 1 gelistet.

Die Umgebung des erwarteten Luftaustritts ist nach dem Einrichten der Mofette zunächst ohne Bewuchs. Im Gesichtsfeld der Kamera befinden sich aber auch mit Gras bewachsene Flächen und Äste eines Baumes, sowie angehäuften Kieselsteine, herabgefallene Äste und ein hölzernes Brett. Im Tagesverlauf ist die Szene zeitweise dem wandernden Schatten der benachbarten Bäume ausgesetzt. Die Vielfalt von Bodenoberflächen ermöglicht den Vergleich deren thermischer Dynamik und sorgt für eine natürlichere Umgebung der künstlichen Mofette. Das Photo Abb. 2 zeigt die Szene im April 2004 kurz nach dem Einrichten der Mofette.

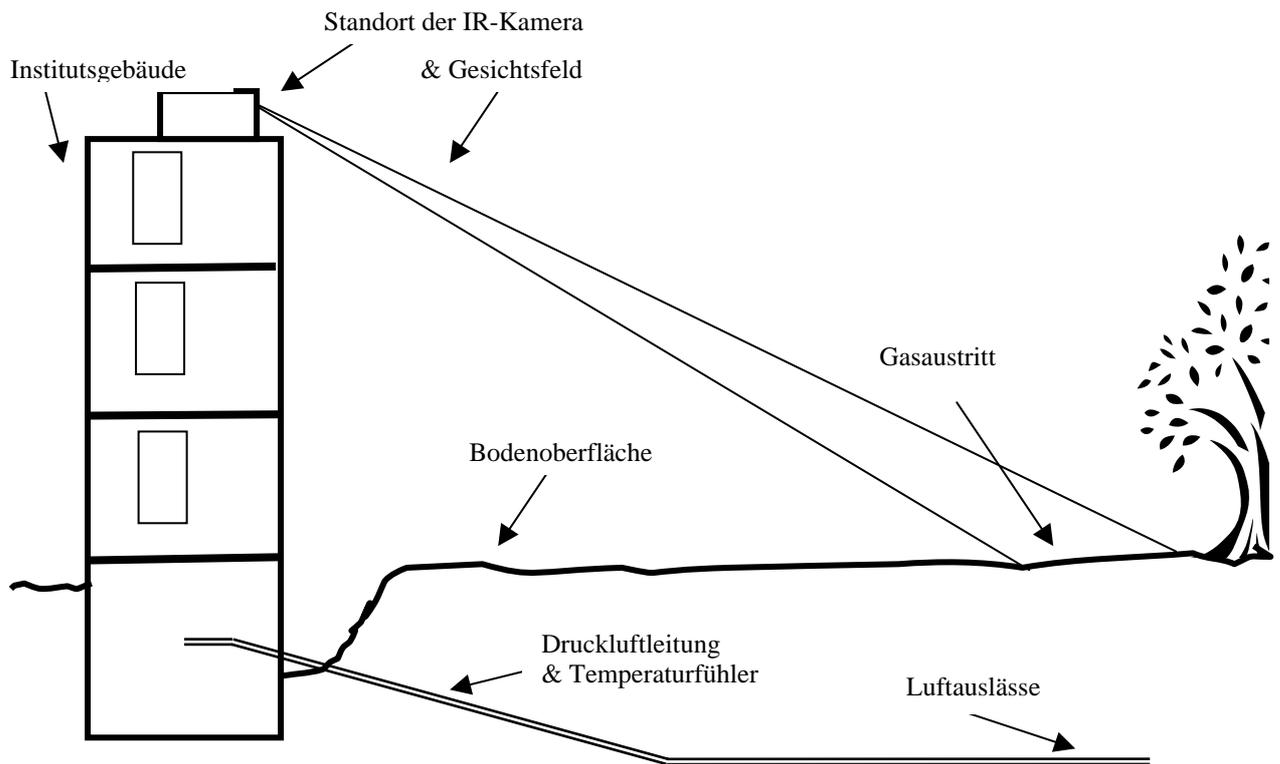


Abb. 1: Skizze des Experimentaufbaus (Schnittansicht)

Tab. 1: Parameter von Kamera und Experiment

Technische Daten der IR-Kamera	
Spektralbereich	7,5 μm – 13 μm
Anzahl Pixel	320 x 240
Gesichtsfeldwinkel	12 ° x 9 °
Geometrische Auflösung	0,65 mrad
Temperaturauflösung	0,15 K
Parameter des Experiments	
Orientierung Sichtstrahl	30 ° zur Horizontalen
Messentfernung	21 m
Erfasste Bodenfläche	ca. 4,5 m x 7 m
Bodenelement (parallax)	ca. 1,35 cm x 1,2 cm bis 1,35 cm x 2,8 cm



Abb. 2: Nahbereich um die Mofette (sie ist im dunklen Erdbereich in der unteren Bildmitte); das schwarze Objekt ist ein Infrarot-Referenzstrahler, er lehnt an einem herabgefallenen Ast, rechts davon liegt ein Brett, in etwa dem gleichen Abstand davor liegen aufgehäufte Kieselsteine, links oben sind die Äste eines Baums, deren Schatten auf der darunter befindlichen Grasfläche erkennbar ist

Kamerasteuerung und Datenerfassung werden von einem mit der Kamera gekoppelter Rechner durchgeführt. In einstellbaren Zeitabständen werden periodisch Einzelbilder aufgenommen und abgespeichert. Dabei bleibt die Kamera ortsfest, die Zuordnung von Bild- und Objektgeometrie ist also konstant. Somit können in der späteren Auswertung zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommene Bilder direkt miteinander verarbeitet werden. Von einer im Gelände vorhandenen Wetterstation stehen folgende Wetterparameter bereit: Lufttemperatur, Relative Luftfeuchte, Luftdruck, Windgeschwindigkeit und -richtung. Eine Aufzeichnung der Sonnenscheindauer und der Sonnenbestrahlungsstärke am Boden steht nicht zur Verfügung. Für die ersten Versuche wurde Luft mit einem Druck von 5,6 bar in die Leitung geführt, das entspricht einem Gasfluss von ca. 880 l/min.

4 Ergebnisse

Einer der mit der Gasleitung eingegrabenen Temperaturfühler ist fest an einer Austrittsöffnung montiert, die anderen liegen etwas abseits der Leitung in gleicher Tiefe, bzw. über dem Austritt näher an der Erdoberfläche. Der Temperaturverlauf vom 27. April bis 12. Mai 04 ist in Abb. 3 dargestellt. Gut erkennbar ist der Temperaturanstieg an der Austrittsöffnung nach Einleitung der Luft. Der langsame Anstieg der ungestörten Bodentemperaturen in 2 m Tiefe ist auf die Jahreszeit zurückzuführen, das langsame Absinken in 1, 65 m Tief auf lang anhaltende Regenfälle. Für die erste beispielhafte Auswertung der Wärmebilder wurde der Bereich vom 7. 5. 16:30 h und 8. 5. 05:00 h ausgewählt. In dieser Zeit wurden 52 Bilder im zeitlichen Abstand von 15 min aufgenommen. Im ersten Schritt wird gesucht, ob eine Mofette vorhanden ist.

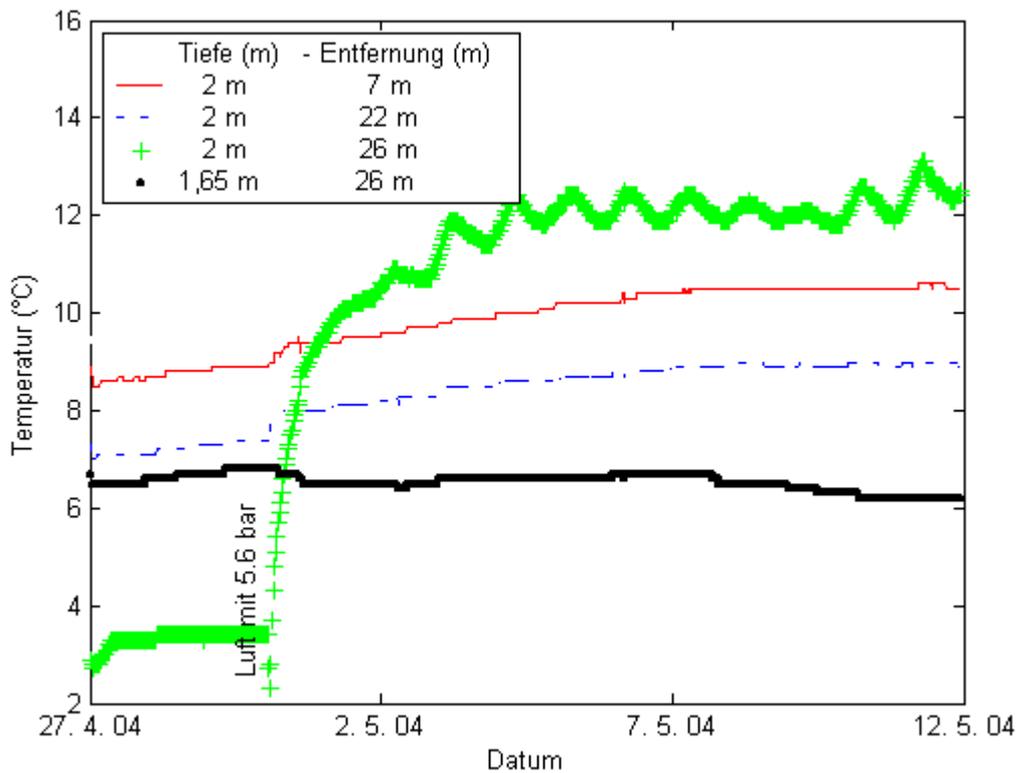


Abb. 3: Bodentemperaturen entlang der Druckluftleitung in verschiedenen Entfernungen von der Gas-einspeisung (Gasaustritt bei 26 m); die grüne Kurve (+) zeigt die Temperatur an der Luftaustrittsstelle, ihre periodischen Schwankungen korrelieren mit dem Tageslauf

Dazu werden aus diesen Daten zu jedem Bildpunkt die geringste und die höchste Temperatur gesucht und voneinander subtrahiert. Die Bildpunkte mit den geringsten Temperaturdifferenzen werden als mögliche Mofette markiert.

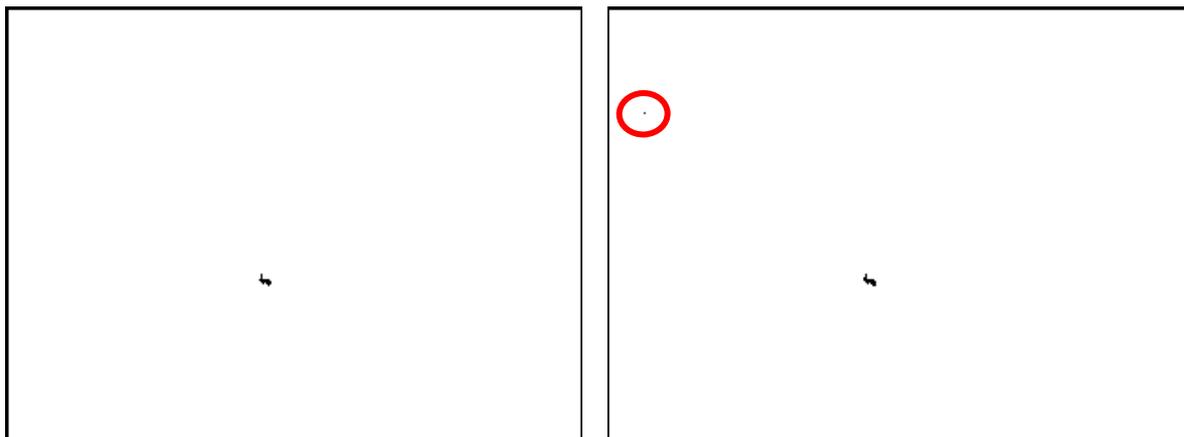


Abb. 4: Bildpunkte aus 52 Thermalbildern mit einer Temperaturdifferenz von $\Delta T < 6,3$ °C (links) und $\Delta T < 6,4$ °C (rechts), der rot umrandete Bildpunkt wird nicht mehr als Mofette gewertet

Es wird dann nach Bildpunkten höherer Temperaturdifferenzen gesucht, bis solche gefunden werden, der nicht an die „Mofette“ angrenzen. Diese werden gesondert markiert (Abb. 4). Im nächsten Schritt wird versucht, die geometrische Ausdehnung des thermischen Gaseinflusses

zu ermitteln. Dazu wird die Temperaturdifferenz weiter erhöht. Es werden immer weitere Bildpunkte als nicht zur Mofette gehörend gefunden, aber auch deren Ausdehnung nimmt zu. Das Verfahren wird abgebrochen, wenn die Temperaturdifferenzen am Rande der Mofette gleich denen ihrer näheren Umgebung sind (Abb. 5).

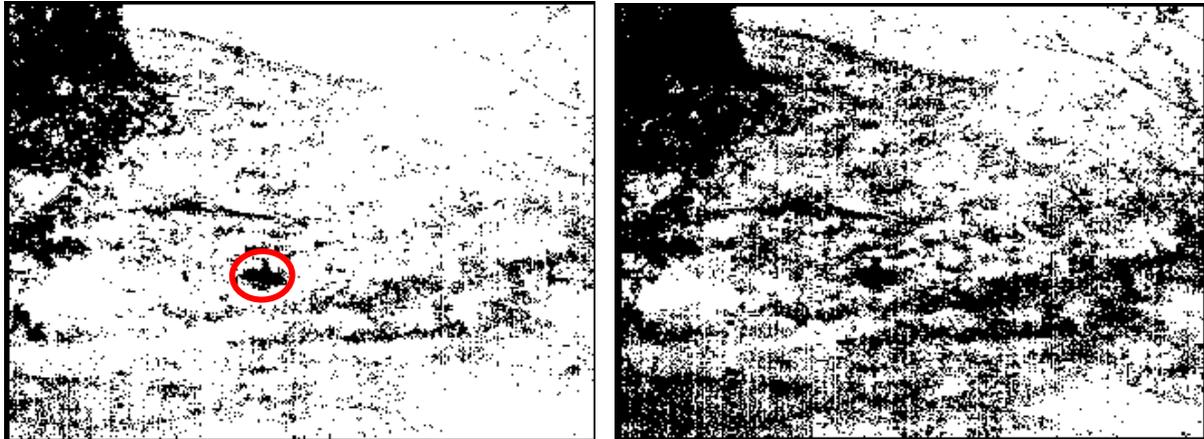


Abb. 5: Bildpunkte aus 52 Thermalbildern mit einer Temperaturdifferenz von $\Delta T < 8,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (links) und $\Delta T < 9,0 \text{ }^\circ\text{C}$ (rechts), die Mofette ist links noch klar abgegrenzt (roter Kreis)

Der zeitliche Temperaturverlauf der gefundenen Mofette und der markanten anderen Objekte (Erde, Kieselsteinhaufen, Gras, Brett, Äste, Blätter am Baum) wird aus den 52 Thermalbildern extrahiert. Er ist für eine Auswahl der Objekte in Abb. 6 dargestellt.

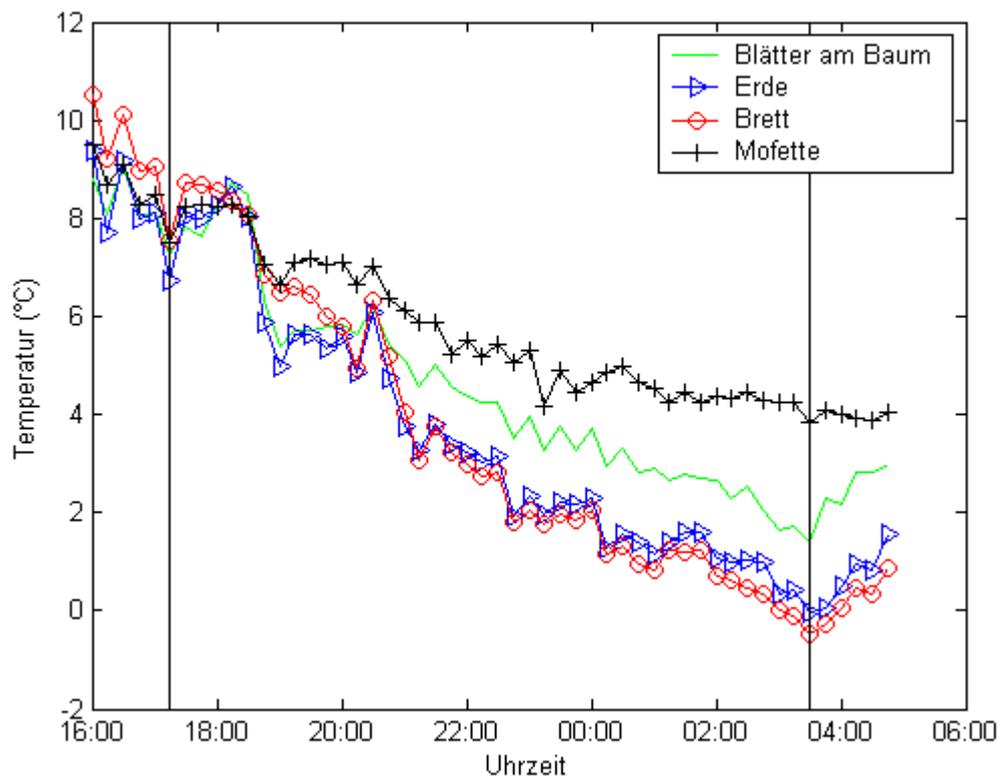


Abb. 6: Zeitlicher Verlauf der Temperaturen einiger Objekte, die Verläufe für alle andern liegen zwischen denen von Erde, Brett und Blättern; der Verlauf für die Mofette ist klar unterschieden

In Abb. 6 sind zwei Uhrzeiten markiert, 17:30 h und 04:00 h. Die zu diesen beiden Zeitpunkten gewonnenen Aufnahmen werden verwendet, um herauszufinden, ob z. B. zwei Überflüge mit einem Infrarotbildaufnehmer zur Fernerkundung von Mofetten ausreichen. Dazu wird die Temperaturdifferenz für jeden Bildpunkt gebildet und wie oben beschrieben verfahren. Thermalbilder, Differenz und Ergebnisse sind in Abb. 7 dargestellt. Abschließend zeigt Abb. 7 auch das Ergebnis der Analyse einer Aufnahmeserie vor Einschalten der Druckluft.

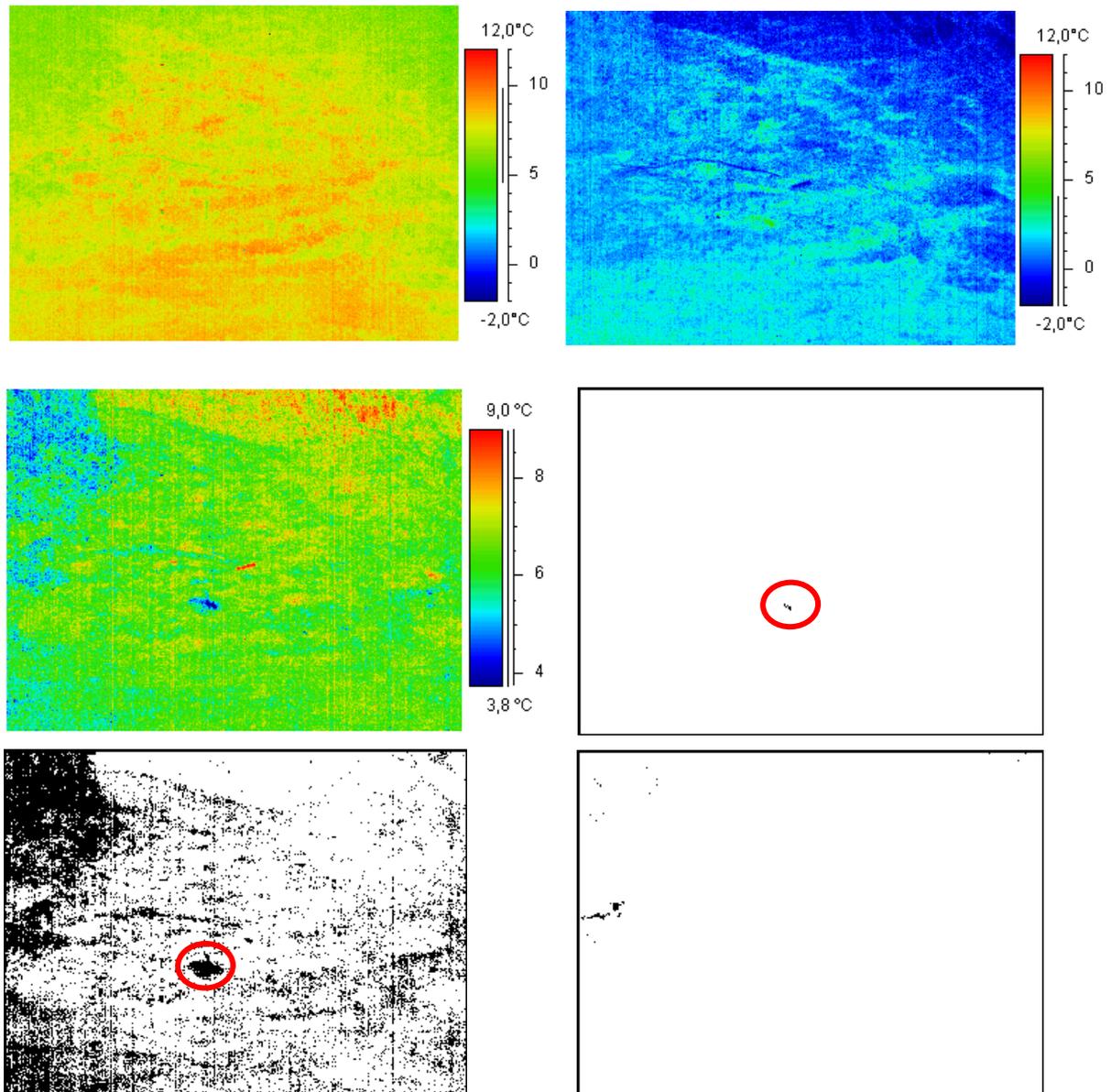


Abb. 7: Thermalbilder vom 7. 5. 17:30 h und 8. 5. 04:00 h (oben links und rechts); Differenzbild (Mitte links), detektierte Mofette bei $\Delta T < 3,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (Mitte rechts, roter Kreis), ermittelte geometrische Ausdehnung bei $\Delta T < 6,0 \text{ }^\circ\text{C}$ (unten links, roter Kreis); Analyseergebnis einer Bildserie vor Einschalten der Druckluft mit $\Delta T < 19,0 \text{ }^\circ\text{C}$ (unten rechts)

Es zeigt sich in Abb. 7 eindeutig, dass zwei zu geeigneten Zeiten aufgenommene Thermalbilder ausreichen, um Gasaustritte zu detektieren und deren Ausdehnung zu bestimmen. Das letzte Bild in Abb. 7 unten rechts demonstriert, dass vor Einschalten der Druckluft sehr hohe

Temperaturdifferenzen überall in der Szene auftreten, die ersten Bildpunkte werden bei einer Differenz von $\Delta T < 19,0$ °C ermittelt. Die später gefundene Mofette ist hier ohne Signifikanz.

5 Ausblick

Die Experimente zeigen schon im frühen Stadium, dass die künstliche Mofette und ihre Untersuchung mit infrarottechnischen Verfahren ein geeignetes Instrumentarium darstellen, die thermischen Effekte von Gasaustritten an der Erdoberfläche und deren komplexe Wechselwirkung mit thermischen Umwelteinflüssen zu untersuchen. Die Detektion von Gasaustritten mit Infrarotbildaufnehmern und die Bestimmung der geometrischen Ausdehnung des thermalen Einflussbereichs des Gases sind bisher an geringe Vorkenntnisse (Mofettengelände) gebunden. Im weiteren Verlauf wird an Verfahren gearbeitet, Gasaustritte auch ohne Vorkenntnisse automatisch in den Bildern zu identifizieren. Ferner werden die dazu z. B. für die Flugzeugfernerkundung am besten geeigneten Umweltbedingungen durch Langzeituntersuchungen ermittelt werden.

6 Literaturverzeichnis

- BANKWITZ P., H. KÄMPF, M. STÖRR AND G. SCHNEIDER (2001): Shear faults in Tertiary clay formation of the Eger Basin (czech Republic) and their role for the degassing of the uppermost mantle, Ber. Inst. Geol. Paläont. Univ. Graz, Vol. 4
- TANK, V., PFANZ, H., GEMPERLEIN, H., STROBL, P., 2004: Infrared remote sensing of Earth degassing – ground study, accepted for publication in: Annals of Geophysics (summer/autumn 2004)
- DE JONG S. M. AND TH. G. CHRIEN (1996): Mapping Volcanic Gas Emissions in the Mammoth Mountain Area Using AVIRIS, AVIRIS Proceedings: 1996, (JPL Publication 96-4)
- WEINLICH F. H., K. BRÄUER, H. KÄMPF, G. STRAUCH, J. TESAR AND S. M. WEISE (1999): An active subcontinental mantle volatile system in the western Eger rift, Central Europe: Gas flux, isotopic (He, C and N) and Compositional fingerprints, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 63, No. 21, pp. 3653- 3671, 1999
- WEISE S. M., K. BRÄUER, H., KÄMPF, G. STRAUCH & U. KOCH (2001): Transport of mantle volatiles through the crust traced by seismically released fluids: a natural experiment in the earthquake swarm area Vogtland/NW Bohemia, Central Europe, *Tectonophysics*, 336, pp. 137-150
- WOLFE, W.L., G.J. ZISSIS, Eds.: *The infrared Handbook*, ERIM, 1989

Untersuchungen zur spektralen Klassifizierung von Magmatiten und Sedimenten nahe Hami, NW-China mit ASTER-SWIR-Daten

THORSTEN SOMMER¹, MARTIN C. SCHODLOK², HANS-ULRICH WETZEL²

Zusammenfassung: Mit Satellitenbilddaten des Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) und Feldspektren wurde eine lithologische Kartierung an meta-sedimentären Gesteinseinheiten durchgeführt. Bisher waren solche Ansätze meist auf hyperspektrale Sensoren reduziert. ASTER besitzt sechs Kanäle im SWIR-Bereich und löst somit Signale von OH-haltigen Mineralen und Karbonaten besser auf, als sonstige multispektrale Sensoren. Feldspektren wurden auf ASTER-Auflösung umgerechnet und ein Subset des Gebiets Atmosphären-korrigiert. Mit Hilfe einer Hauptkomponenten-Analyse (PCA) wurden Endmember extrahiert. Mit diesen konnte das Testgebiet mittels Spectral Angle Mapper klassifiziert werden. Die Methodik wurde auf ein Testgebiet in der autonomen Region Xinjiang, Volksrepublik China, SW von Hami angewandt und stellt eine deutliche Verbesserung bisheriger geologischer Kartierungen dar.

1 Einleitung

Al-OH-, Mg-OH- und C-O-führende Minerale zeigen charakteristische Absorptionsbanden im SWIR-Bereich zwischen 1.6 μm und 2.5 μm (z.B. HUNT et al. 1971). Seit vielen Jahren werden erfolgreich Studien zur Kartierung entsprechender Minerale durchgeführt. Datenquellen waren bisher meist hochauflösende hyperspektrale Sensoren in Flugzeugplattformen (z.B. KRÜGER et al., 2001). Der Einsatz solcher Systeme kann jedoch meist nur lokal flächendeckend sein.

Multispektrale Satellitendaten decken weite Teile der Erdoberfläche ab. Allerdings besitzen die meisten multispektralen Sensoren nur wenige Kanäle im SWIR-Bereich. Spektrale Untersuchungen erschienen daher bisher kaum sinnvoll. Mit dem 1999 gestarteten Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) ergeben sich neue Möglichkeiten. ASTER, ein auf dem Satelliten Terra installierter Sensor ist Teil des Earth Observing System (EOS) der US-amerikanischen National Aeronautics and Space Administration (NASA). Im Gegensatz zu z.B. Thematic Mapper (TM), der in diesem Wellenlängenbereich nur zwei Kanäle aufweist, besitzt ASTER sechs Kanäle im Bereich 1.6 μm bis 2.5 μm . Damit sollte die Differenzierung von Mineralen, die Al-OH, Mg-OH oder C-O enthalten, verbessert werden (z.B. ROWAN et al., 2003).

Ziel dieser Arbeit war es, Möglichkeiten der spektralen Klassifizierung mit ASTER-Daten zu untersuchen. Angewendet wurde die Methodik auf ein Testgebiet in der Autonomen Region Xinjiang, Volksrepublik China, das aufgrund von Vorkommen an Rohstoffen und Lagerstätten besondere wirtschaftliche Bedeutung besitzt.

¹ Dipl.-Ing. Thorsten Sommer, Institut für Geowissenschaften, Universität Potsdam, Am Neuen Palais 10, D-14469 Potsdam, e-mail: tsommer@rz.uni-potsdam.de

² Dipl.-Geol. Martin C. Schodlok, Dr. Hans-Ulrich Wetzel, GeoForschungsZentrums Potsdam, Department 1, Sektion 1.4, Telegrafenberg A 17, D-14473 Potsdam, e-mail: wetz@gfz-potsdam.de

2 Geologischer Rahmen

Das heutige Zentralasien ist das Produkt einer komplizierten Terran-Kollage. Diese entstand im Paläozoikum durch Akkumulation mehrerer krustaler Fragmente an den Südrand der Sibirischen Plattform. Dabei kam es zur Bildung bedeutender Suturen, die im Tertiär vielfach reaktiviert wurden (z.B. SENGÖR et al., 1993).

Die Chöl Tagh (auch Qoltag), ein mittelgebirgsähnlicher Höhenzug südlich des Turfan-Hami Beckens stellt einen tektono-magmatischen Gürtel dar und repräsentiert den oberpaläozoischen aktiven Kontinentalrand in Form eines ehemaligen Inselbogens (MA et al., 1993). In diesen Einheiten liegt ein Gürtel von meist granitischen Intrusionen.

2.1 Lithologie im Testgebiet

Die vorherrschenden Einheiten im Projektgebiet bestehen aus meta-sedimentären spät-paläozoischen Vulkano-Klastika, die zu zwei lithologischen Einheiten zusammengefasst werden. Die Gandun Formation (Abb. 1, C1) bildet das Untere Karbon und besteht hauptsächlich aus Tonschiefern und Sandsteinen, Quarziten, Tuffen, Rhyolithen, Andesiten und Basaltlagen. Das Oberkarbon wird gebildet durch die Wutongwozi Formation (Abb. 1, C2), die aus Sandsteinen mit dazwischenliegenden Tuffen und Basalten besteht (WETZEL, 2003, mündlich).

In die vulkanoklastischen Sedimentgesteine drangen syn-orogene Plutonite unterschiedlicher Zusammensetzung ein. Dabei handelt es sich um Kalium-reiche Granite, Diorite, sowie Gabbrokörper. Die Plutonite lassen sich in 2 Gruppen von Intrusionen einteilen. Die einen sind bereits im Karbon intrudiert (Abb. 1, karbonische Granite, Gc, karbonische Diorite Dc) die andere Gruppe ist permischen Alters (Abb.1 , Gp). Diese jüngeren Granite wurden von GU et al. (1996) mittels Rb-Sr auf 260.2 ± 6.2 Ma datiert.

An den Hängen und Geländekanten bilden sich z.T. große Schuttfächer pleistozänen bis rezenten Alters. Die Niederungen werden gebildet von quartären Schottern, Sanden und Tonen, (WETZEL, 2003, mündlich).

2.2 Geländeaufenthalt und Bildinterpretation

Ein Geländeaufenthalt (2002), sowie die Bildinterpretation der ASTER-Daten zeigten eine viel differenziertere Lithologie als bisher beschrieben. So besteht die Gandun Fm z.B. örtlich aus Qz-Bt-Gneisen und Glimmer-Schiefern, lokal stehen schwach metamorphe Kalke und Marmore an. Basische Gänge durchziehen das Gebiet. (WETZEL 2002, unveröffentlicht). Die Bildinterpretation lies ferner saure Gangschwärme in der Wutongwozi Fm erkennen. Örtlich existieren noch die Reste der spätpaläozoischen Vulkane. Außerdem zeigt die ASTER-Szene eine klare Differierung zwischen (bisher zusammengefassten) Festgestein und Lockermaterial, meist in Form von Fächern. Alle diese Elemente blieben bisher unkartiert.

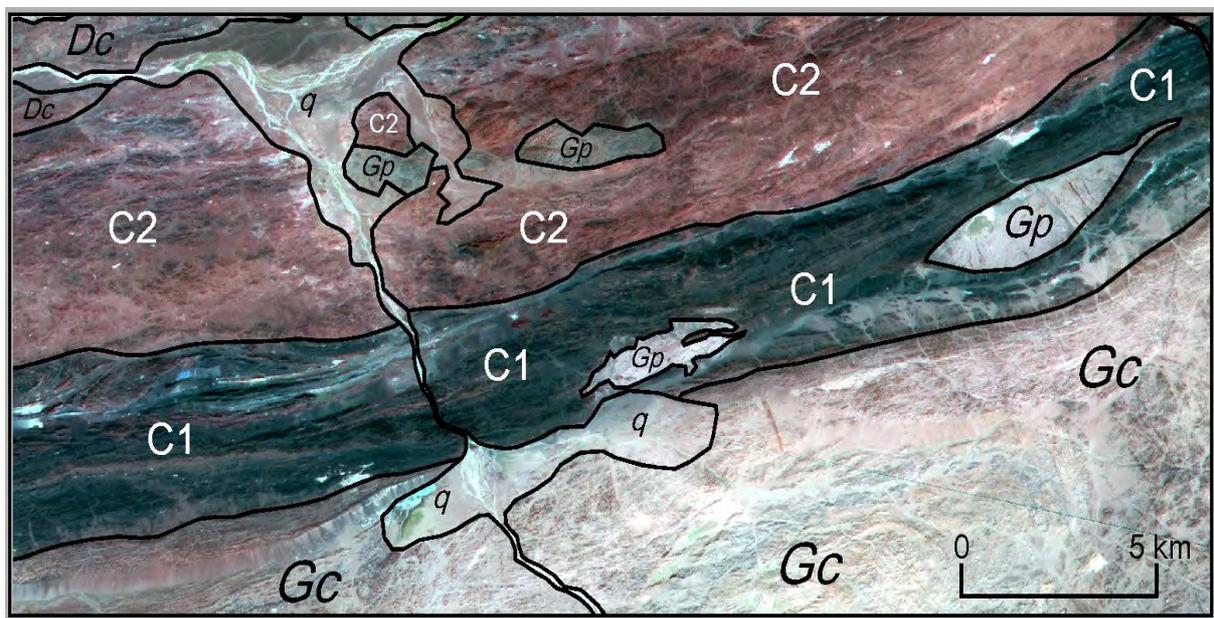
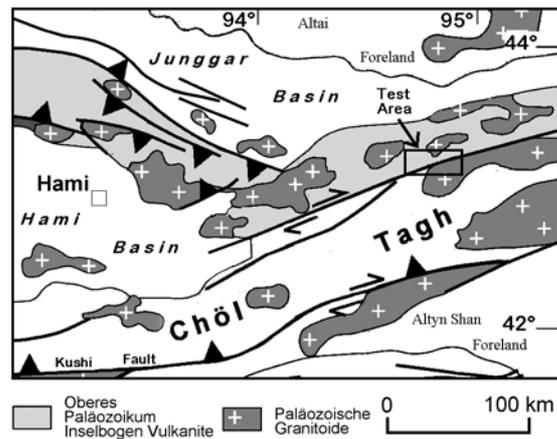
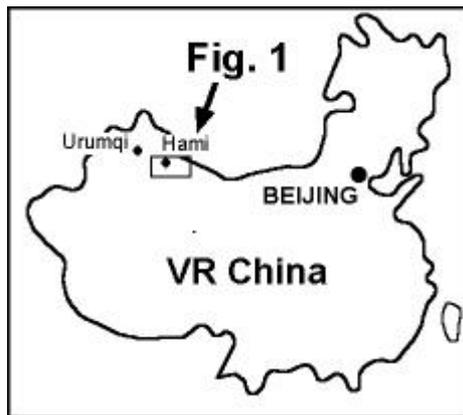


Abb. 1: oben: Lage des Testgebiets im tektonisch aktiven NW-China
 Abb. 1: unten: ASTER-Subset mit den wesentlichen Einheiten (unten), q = Quartär, C1 = Unteres Karbon, C2 = Oberes Karbon, Gc = Granite, Karbon, Dc = Diorit, Karbon, Gp = Granite, Perm

3 Datengrundlagen

3.1 Feldspektren

Während des Geländeaufenthaltes 2002 wurde die Bodenreflexion mit dem Feldspektrometer „PRO FR“ der Firma Analytical Spectral Devices™ (ASD) gemessen. Das Gerät hat eine spektrale Auflösung von 3-10 nm. Gemessen wurde im Bereich von 0.5 μm bis 2.5 μm relativ zu Spektralon. An hellen und dunklen relativ großen und möglichst homogenen Flächen wurden aus jeweils ca. 30 Messungen Mittelwertspektren errechnet. Die Mittelung gewährleistete, dass diese Testflächen repräsentativ wiederzugeben werden. Diese Mittelwertspektren dienten der Kalibrierung der ASTER-Daten (siehe 3.3). Zusätzlich wurden entlang von mehreren Profilen kleine Testflächen gemessen, um umfangreiche spektrale Daten über die lithologischen Einheiten im Projektgebiet zu sammeln.

3.2 Datenvorprozessierung

Satellitenbilddaten liegen zunächst als radiance-Daten vor, d.h. die Bildpixel repräsentieren Grauwerte von 0 = schwarz bis 255 = weiß. Der Energieabfall der Sonne außerhalb des sichtbaren Lichts sowie atmosphärische Einflüsse spiegeln sich dabei in den Daten wieder. Für spektrale Untersuchungen von Satellitendaten müssen daher die radiance-Daten erst in reflectance-Daten umgerechnet werden. Dazu wurden die Feldspektren auf die spektrale Auflösung des ASTER-Sensors umgerechnet. Die resampelten Feldspektren dienen als Referenz für eine Atmosphärenkorrektur und somit für die Kalibrierung der ASTER-Daten.

3.2.1 Resampling der Feldspektren

Die Feldspektren hatten eine spektrale Auflösung von über 200 Kanälen pro Spektrum (s.o.). Um diese mit den Spektralinformationen der ASTER-Daten vergleichbar zu machen, mussten die Spektren erst der spektralen Auflösung des ASTER-Sensors (9 Kanäle) angepasst werden. Durch das Fehlen von ASTER-Sensoren im spektralen Bereich zwischen 0.9 μm und 1.6 μm wird der vordere Teil der resampelten Feldspektren stark interpoliert. Der Bereich zwischen 2.0 μm und 2.5 μm wird ebenfalls generalisiert, behält aber aufgrund der höheren Auflösung und der höheren Anzahl der Sensoren seine charakteristischen Merkmale bei (Abb. 2).

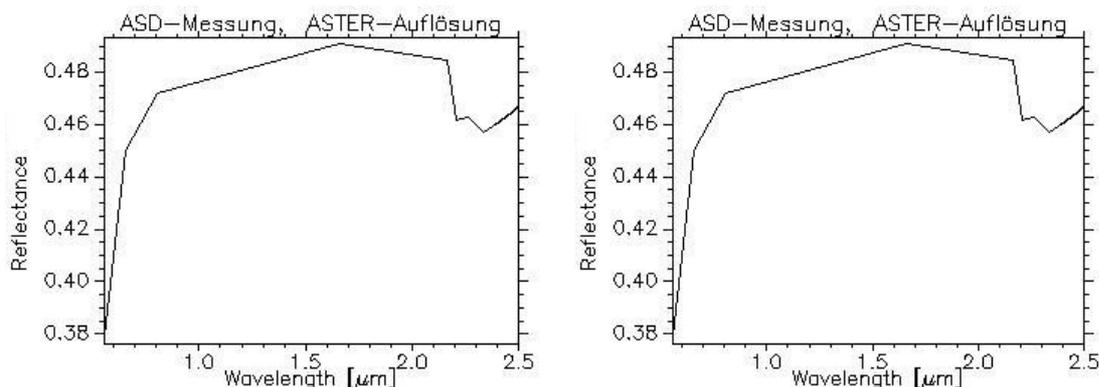


Abb. 2: Mittelwertspektren einer Tonfläche in ASD-Auflösung (links), sowie umgerechnet auf ASTER-Auflösung (rechts)

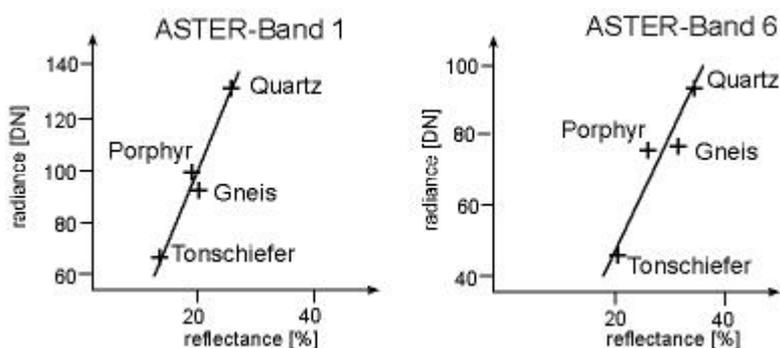


Abb.3 : Atmosphärenkorrektur mit empirical line calibration. Geplottet wurden reflectance der Feldspektren (x-Achse) gegen radiance der ASTER-Szene (y-Achse) für Kanal 1 und Kanal 6

3.2.2 Atmosphärenkorrektur

Für den Ansatz einer spektralen Klassifizierung von multispektralen Daten kommt einer Atmosphärenkorrektur enorme Bedeutung zu, da sie die Umwandlung von radiance- in reflectance-Daten steuert (RICHTER, 1996). Zur Anwendung kam die Empirical Line Kalibration. Dafür wurden vier im Gelände gemessene Kalibrationsflächen verwendet. Die Methode berechnet für jeden der neun ASTER-Kanäle eine eigene Ausgleichsgerade zwischen Sensor-radiance und Boden-reflectance (Abb. 3).

3.2.3 Bewertung der Kalibration

Der Vergleich von kalibrierten ASTER-Spektren mit den Feldspektren zeigte bei höheren Reflexionswerten (helle Gesteine) eine weitgehende Übereinstimmung der jeweiligen Spektren. Im unteren Reflexionsbereich (dunkle Gesteine) gab es eine Abweichung in der Reflexion von 0,1. Insgesamt kann daher von einer guten Kalibrierung ausgegangen werden. Nur der vordere Bereich der Kurven weicht aufgrund der starken Interpolation sowohl bei hellen, wie auch bei dunklen Targets leicht voneinander ab (Abb. 4 und Abb. 5).

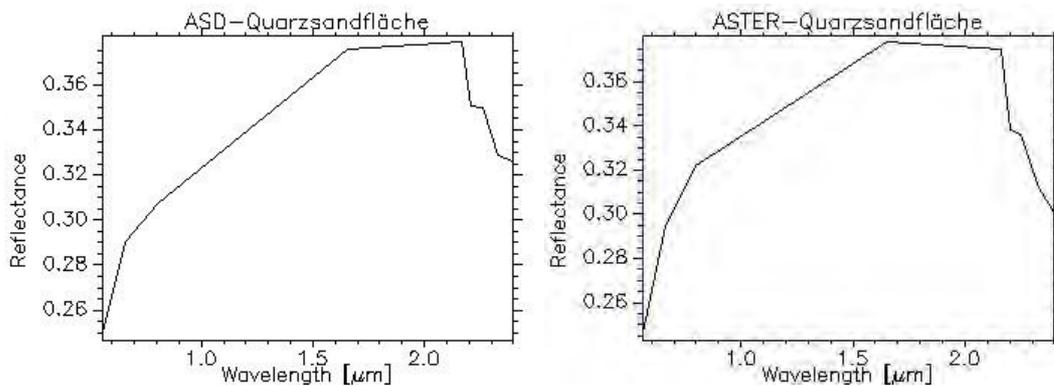


Abb. 4: Mittelwertspektrum einer Quarzsandfläche im Gelände gemessen, ASTER-Auflösung (links), sowie Mittelwertspektrum der selben Fläche aus der ASTER-Szene (rechts)

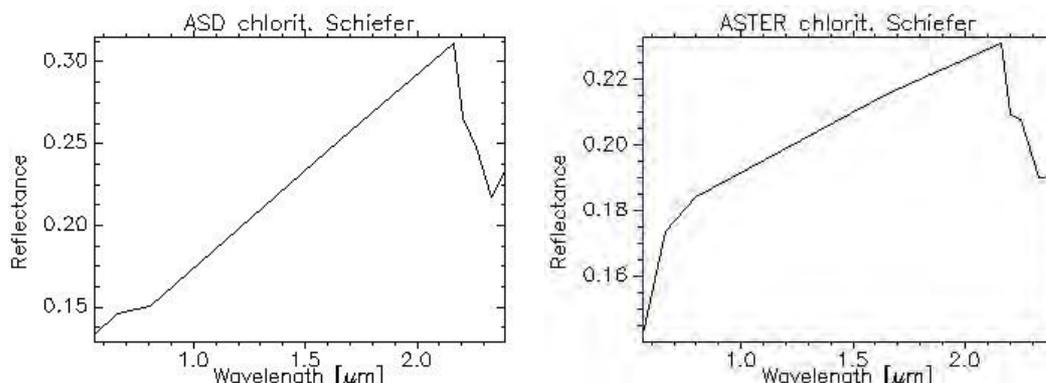


Abb. 5: Mittelwertspektrum einer chloritisierten Schieferfläche im Gelände gemessen, ASTER-Auflösung (links), sowie Mittelwertspektrum der selben Fläche aus der ASTER-Szene (rechts)

4 Methodik

4.1 PCA zur Auswahl der Endmember

Die vom Sensor aufgenommene Bodeninformation hängt grundsätzlich von Faktoren, wie dem Relief, der Lithologie und der Vegetation eines Testgebietes ab. So werden die Daten immer auch von Schatten- und Albedoeffekten der Oberflächenmaterialien beeinflusst. Die Methode der Hauptkomponenten-Analyse (principal component analysis, PCA) ist ein effektvolles statistisches Tool, um solche irradiance-Daten eines Satellitenbildes zu unterdrücken und dafür die spektralen reflectance-Eigenschaften geologischer Targets zu verstärken (z.B. CRÓSTA et al., 2003).

Dabei wird eine multispektrale Szene als n-dimensionaler Datensatz betrachtet, wobei n die Anzahl der Sensoren (Bänder) darstellt. Das ASTER-Testgebiet dieser Arbeit stellt also im Wellenlängenbereich von 0.5 μm bis 2.5 μm (9 Kanäle) einen 9-dimensionalen Raum dar. Die PCA selektiert nun unkorrelierte Linearkombinationen (Hauptkomponenten, PC) so, dass in jede erfolgreich extrahierte PC spektrale Unterscheide der Einheiten zueinander deutlicher werden (LOUGHLIN, 1991).

PCA wurde auf den ASTER-Subset (Abb. 1) angewandt. Gesteinseinheiten, die sich in der PCA als signifikant unterschiedlich herausstellten, wurden jeweils spektral untersucht. Dazu dienten vor allem die Feldspektren, Spektralbibliotheken und z.T. Geländeaufzeichnungen. So wurden insgesamt 12 Endmember gefunden (plus 1 Klasse „not classified“).

3.4 Klassifizierung mit Spectral Angle Mapper

Spectral Angle Mapper (SAM) ist ein Tool, um spektrale Gemeinsamkeiten zwischen Referenzspektren und Testspektren zu finden. Durch Vergleiche der Winkel zwischen dem Test- und dem Referenzspektrum stellt der Algorithmus die spektrale Gleichheit (bzw. die spektralen Unterschiede) fest. Dabei werden die Spektren als Vektoren in Raum aufgefasst, dessen Dimensionalität der Anzahl der Bänder entspricht. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist die Unabhängigkeit von Albedo-Effekten, da nur die Winkel im Spektrum betrachtet werden, nicht aber die Höhe des Spektrums auf der reflectance Achse (y-Achse), (KRUSE et al. 1993).

3.5 Ergebnisse

Abb. 5 zeigt die Möglichkeiten dieses Verfahrens bei der Detailkartierung eines dextral gelenkten Gabbrokörpers. Das Zentrum des Aufschlusses besteht aus basaltischem bis ultrabasischen Material (C1b). Das gleiche Signal zeigen basische Gänge an den Rändern des Körpers. Ein Teil des Inneren wurde aufgrund von Absorptionsbanden bei 2.2 μm , (Al-OH) der Gandun Fm. (C1) zugeordnet. Der südliche Rand zeigt granitischen Chemismus (C1g), der sonstige äußere Rand wird gebildet aus erodiertem Lockermaterial des Gabbros (qc1). Weiter südlich sprechen starke Banden bei 2.35 μm für Karbonate, bzw. Marmore (Kalksignatur). Am oberen Bildrand ist ein Aufschluss der Wutongwozi Fm. (C2) zu sehen, umgeben von Lockermaterial der gleichen Zusammensetzung (qc2).

4 Diskussion und Ausblick

Die angewandte Methode zeigt, dass in ariden Gebieten verschiedene Gesteinsserien mit ASTER-Swir-Bändern unterschieden werden können. So führt die Methode der PCA plus Klassifizierung mit Spectral Angle Mapper in Verbindung mit Feldspektren zu folgenden

Erkenntnissen: grundsätzlich ist eine Unterscheidung von Fest- und Lockermaterial möglich. Spektrale Merkmale lassen bei geringer Transportweite, wie z.B. in Fächern zudem Rückschlüsse auf das Liefergebiet zu. Al-OH-führende Minerale (Banden bei 2.2 μm), wie Tonminerale können von anderen Serien unterschieden werden. Allerdings sind durch die Bodenauflösung von 30 x 30 m im SWIR-Bereich Grenzen z.B. bei der Suche nach Alterationszonen gesetzt. Dagegen zeigen Karbonate sichere spektrale Muster (Banden bei 2.35 μm) und können auskartiert werden. Eine weitere Unterscheidung in Kalzit und Dolomit erscheint dagegen nicht möglich.

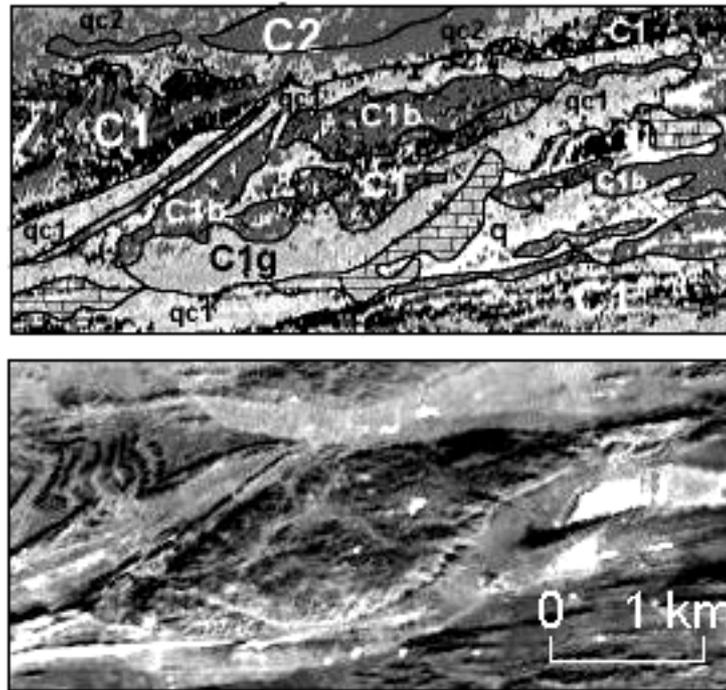


Abb. 6: Detailkartierung eines ASTER-Ausschnitts. Ein bisher lithologisch zusammengefasster Gabbro-Aufschluss (unten) wurde gemäß Klassifizierungsergebnis (oben) weiter unterteilt, Kürzel: siehe Text

Zur Verfeinerung der untersuchten Methode sollten weitere Prozesse eingebunden werden. So ist aufgrund der spektralen Überdeckung durch aeolische Sande und Eisenoxidkrusten eine wichtige Fragestellung die der spektralen Entmischung. Mehrere Arbeiten (z.B. FERRIER et al., 2002) zeigten interessante und vielversprechende Ansätze zum „spectral unmixing“ von TM-Daten. Bei weiterer Analyse sollte daher u.a. geprüft werden, in wie weit mit der unmixing-Methode die lithologische Untersuchung mit ASTER-SWIR-Bädern weiter verbessert werden kann.

5 Literaturverzeichnis

- CRÓSTA, A., P., DE SOUZA FILHO, C., R., AZEVEDO, F., BRODIE, C., 2003: Targeting key alteration Minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24, no. 21, p4233-4240.
- FERRIER, G., WHITE, K., GRIFFITHS, G., BRYANT, R., STEFOULI, M., 2002: The mapping of hydrothermal alteration zones on the island of Lesvos, Greece using an integrated

- remote sensing dataset, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 23, no. 2, p341-356.
- GU, L., YANG, H., 1996: Geology and genesis of peraluminous granites in East Tien Shan, *Chinese Journal of Geochemistry*, p33-43.
- KRÜGER, G., REINHAECKEL, G.F., SEGL, K., ZOCK, A., REIN, B., GLÄBER, W., ERZINGER, J., KAUFMANN, H., 2001: Quantitative determination of kaolinite, organic carbon, pyrite, and quartz contents from DAIS 7915 hyperspectral imagery. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG)*, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- HUNT, G., R., SALISBURY, J., W., LENHOFF, C., J., 1971: Visible and near infrared spectra of minerals and rocks, III, Oxides and hydroxids, *Modern Geology*, 2, p195-205.
- KRUSE, F., A., 1988: Use of airborne imaging spectrometer data to map minerals associated with hydrothermally altered rocks in the northern Grapevine Mountains, Nevada, *Remote Sensing of Environment*, 24, p31-52.
- KRUSE, F., A., LEFKOFF, A., B., BOARDMAN, J., W., HEIDEBRECHT, K., B., SHAPIRO, A., T., BARLOON, P., J., GOETZ, A., F., H., 1993: The Spectral Image Processing System (SIPS) – Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data, *Remote Sensing of Environment*, 44, p145-163.
- LOUGHLIN, W., P., 1991: Principal Component Analysis for Alteration Mapping, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 57, no. 9, p1163-1169.
- MA, R., WANG, C., YE, S., 1993: Tectonic framework and crustal evolution of eastern Tien Shan mountains, Nanjing Publishing House, Nanjing University, 225 pages.
- RICHTER, R., A spatially adaptive fast atmospheric correction algorithm, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 17, no. 6, p1201-1214, 1996.
- ROWAN, L., C., HOOK, S., J., ABRAMS, M., J., MARS, J., C., 2003: Mapping hydrothermally Altered rocks at Cuprite, Nevada, using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), a new satellite-imaging system, *Economic Geology*, vol. 98, p1019-1027.
- SENGÖR, A.M.C., NATAL'IN, B.A., BURTMAN, V.S., 1993: Evolution of the Alaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia, *Nature*, 364, p299-306.

Satellitenbildoptimierung und Zielklassenkartierung alterierter Mineralisationen in den zentralen Anden Chiles

NORBERT OTT & TANJA KOLLERSBERGER¹

Zusammenfassung: Die Kombination von geologischen, tektonischen, geophysikalischen, topografischen mit fernerkundlichen Daten erlaubt eine optimierte Modellierung der Datenbasis zur Lokalisierung von Kupfer-, Eisen- und Goldmineralisationen in den zentralen Anden Chiles. Aus dem Gesamtdatensatz des Arbeitsgebietes wurden Testgebiete bekannter Lagerstätten als Referenzen ausgewählt und die Daten für die GIS-basierten Analysen aufbereitet und interpretiert. Als Ergebnis konnte für die bekannten Kupferlagerstätten von Chuquicamata, La Escondida und Quebrada Blanca eine sehr hohe Korrelation von optimierten Satellitenbilddaten in Verbindung mit geologischen Gesteinseinheiten und tektonischen Störungen sowie magnetischen Anomalien festgestellt werden. Diese charakteristischen Merkmale werden als Zielklassifizierung auf die Gesamtdatensätze des Arbeitsgebietes angewandt, um bisher unbekannte Mineralisationen zu lokalisieren.

1. Einleitung

Die zentralen Anden sind Teil eines Subduktionsorogens an einem konvergenten Plattenrand. Die ozeanische Nazca-Platte taucht in Richtung Osten unter den Westrand der kontinentalen südamerikanischen Platte ab. Obwohl präkambrische Elemente in den Anden eingebaut sind (LUCASSEN ET AL., 2000), ist ihr geologischer Bau durch die Kollision beider Platten und die beginnende Subduktion während der Kreide geprägt (LAMB ET AL., 1997). Känozoische Deformationsphasen führten zur Reaktivierung präkambrischer Störungssysteme. Die tektonischen Prozesse initiieren den jungen andinen Vulkanismus. Durch den Aufstieg magmatischer Schmelzen kommt es zur Bildung bedeutender Lagerstättenprovinzen in den Anden. Die Zusammenhänge zwischen neogenem Magmatismus, tektonischer Entwicklung und Lagerstättenbildung werden kontrovers diskutiert (JAMES & SACKS, 1999; KAY ET AL., 1999; OYARZUN, 2000). Die andinen Kupfer-Molybdän- und Goldmineralisationen sind an porphyrische Gesteine gebunden. Durch Alterationsprozesse und Oxidation ist der primäre Mineralbestand der magmatischen Komplexe umgewandelt (ASTUDILL ET AL., 2003). Die GIS-basierten Analysen zielen auf die alterierten Gesteine und deren spektralen und geophysikalischen Eigenschaften und wurden an bekannten Lagerstätten als Referenz getestet.

2. Geologischer Überblick der zentralen Anden Chiles

Das Andenorogen liegt am westlichen Rand des südamerikanischen Kontinents und weist eine Länge von 7500 km in Nord-Süd-Erstreckung auf. Die Anden werden durch eine Anzahl von Zonen oder Ketten gestaltet, denen unterschiedliche Bildungs- und Klimabedingungen zugrunde liegen. Zusätzlich wird aufgrund dieser unterschiedlichen Bedingungen eine regionale Trennung in Südanden (Feuerland bis Valparaiso), Zentralanden (bis zur Grenze Peru/Ecuador) und Nordanden (bis zur Sierra Nevada in Kolumbien) vorgenommen.

¹ Dr. Norbert Ott, Cand. Geophys. Tanja Kollersberger, Institut für Geologische Wissenschaften, Freie Universität Berlin, Malteserstr. 74-100, D-12249 Berlin, e-mail: nott@geophysik.fu-berlin.de

Die geologische Entwicklungsgeschichte der zentralen Anden ist vielfältig und in den einzelnen Baelementen sehr unterschiedlich. Das Arbeitsgebiet in Nordchile umfasst Bereiche der Küstenkordillere mit präkambrischen Gneisen und Granuliten sowie paläozoischen Batholithen und metamorphen Serien. Die östlich anschließende Präkordillere setzt sich aus präkambrischen Metamorphiten mit überlagernden paläozoischen und mesozoischen Serien zusammen. In diese Serien intrudierten kretazische und känozoische Plutonite. Der Aufbau der Westkordillere mit den höchsten Erhebungen in den Anden ist ähnlich dem der Präkordillere und durch mächtige känozoischen Vulkanite (Ignimbrite und Stratovulkane) gekennzeichnet.

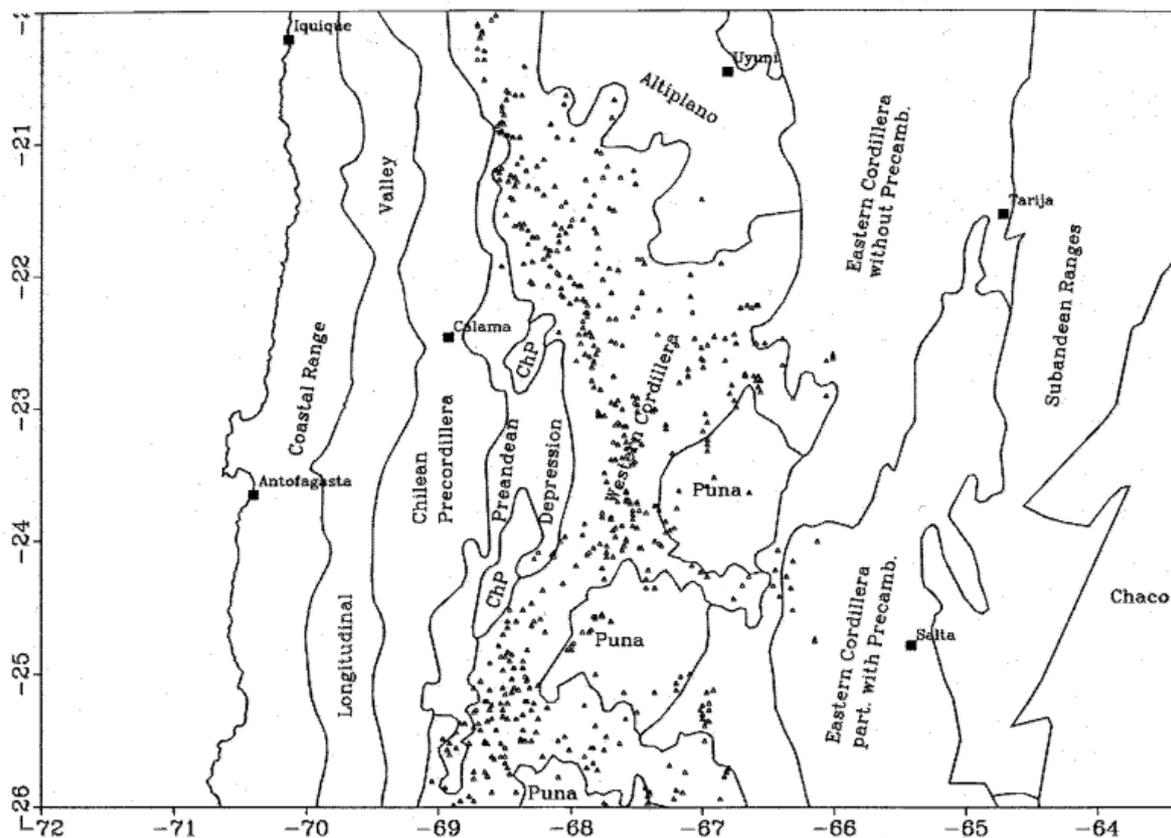


Abb. 1: Übersichtskarte der zentralen Anden mit Lage der geologischen Strukturelemente und dem vulkanischen Bogen der Westkordillere.

Die jüngere geologische Entwicklung ist durch känozoische Deformationsphasen und Plateaubildungen gekennzeichnet. Tektonische Prozesse führten zur aktiven Deformation und Hebung der zentralen Anden. Die einzelnen Ketten werden durch prominente Störungszonen in Graben- und Horststrukturen gegliedert, wobei die Tiefenlage des kristallinen Basements und die Mächtigkeiten der Decksedimente variieren. Oftmals werden präkambrische Störungszonen des Basements reaktiviert und setzen sich bis an die Erdoberfläche fort, wo sie hervorragende Indikatoren für geologische Blockgrenzen im Untergrund darstellen. Diese tiefreichenden Vergitterungen von Bruchstrukturen und Störungen sind wiederum geeignete Aufstiegszonen hydrothormaler Lösungen, an denen es zu Anreicherungen von mineralischen Rohstoffen in Form von Erzen kommen kann. Der Vulkanismus migriert in östliche Richtung. Mit dem Wandern der vulkanischen Aktivität verlagern sich die Bereiche hydrothormaler Mineralisationen. Die ältesten metallogenetischen Provinzen der frühen Kreide treten in der Küstenkordillere auf, während der paläozäne-eozäne Kupfergürtel in der Präkordillere liegt. Der

miozäne Maricunga-Gürtel liegt in der Vulkankette der Westkordillere.

Die Bildung bedeutender Rohstofflagerstätten erfolgte in geologisch junger Zeit und steht in der Regel in Kontakt zu magmatischen Gesteinen. In den Anden liegen zum Beispiel die weltweit größten bekannten Kupferlagerstätten sowie bedeutende Zinn- und Goldvorkommen. Kupfermineralisationen treten in Imprägnationslagerstätten (*porphyry copper ores*) auf. Deren Bildung geht auf Lösungen von Kupfer und Molybdän zurück, die zerklüftete Gesteine durchtränken und feinste Klüfte ausfüllen. Größte und zugleich bekannteste Kupferimprägnationslagerstätte ist Chuquicamata in Nordchile. Bei polymetallischen Lagerstätten mit Blei-Zink-Kupfer-Silber-Paragenesen besteht eine enge Beziehung zu kompressiven tektonischen Strukturen und dem jungen Vulkanismus bei der Mineralisation (VILLALPANDO ET AL., 1994). Die Goldvorkommen der Hochkordillere sind an Gold-Silber-Quarzgängen der Batholithe gebunden, respektive in Seifen angereichert.

3. Datenbasis und GIS

Für die Lokalisierung alterierter Gesteine und Mineralisationen mittels GIS-basierter Analysen und einer Zielklassenkartierung konnten folgende Eingangsdaten in das Anden-GIS integriert werden:

- Digitale Höhendaten (SRTM 90 x 90 m)
- Satellitenbilddaten (Landsat TM und ETM+)
- Geologische Daten (Digitale Karten des Sernageomin)
- Strukturgeologische Daten (Digitale Karten des Sernageomin,)
- Magnetische Daten (Sernageomin, Codelco)
- Schweredaten (Bouguer Anomalie, isostatische Anomalie, FU Berlin, SFB 267)
- aus der Datenbasis abgeleitete Daten und Modellierungen.

Die umfangreichen Daten des gesamten Arbeitsgebietes werden im Anden-GIS nach dem Ebenen-Prinzip thematisch strukturiert und verwaltet. Die fernerkundlichen Satellitenbilddaten mit zusätzlichen Meta-Daten stellen in dem Verzeichnisbaum des Anden-GIS eine Ebene dar, welche in 18 Unterverzeichnisse gegliedert ist, die jeweils eine Satellitenbildszene verwalten. Dagegen erfolgt die Strukturierung der räumlich kleinen Testgebiete mit allen Datenebenen nach der Lokalität. Im Anden-GIS werden die Daten der fünf Testgebiete als eigenes Projekt verwaltet, zum Beispiel das Projekt Chuquicamata mit 23 thematischen Ebenen. Diese Art der Datenstrukturierung hat sich in früheren GIS-Projekten bewährt (OTT ET AL., 2002). Der Datenumfang des Anden-GIS mit Originaldaten, Analysedaten, Ergebnissen und Karten sowie den Projektdaten der Testgebiete beträgt momentan 20 GB in 200 Verzeichnissen mit 4.100 Dateien.

Ein ganz entscheidender Aspekt durch die Integration geophysikalischer und fernerkundlicher Daten ist die Kombination und Korrelation der Tiefeninformationen von Potentialfeldern und spektralen Oberflächensignaturen der Satellitensensoren. In der Abbildung 2 ist die isostatische Schwereanomalie mit Daten des Landsat-ETM+ überlagert. Deutlich ist ein Schwereminimum unter dem vulkanischen Bogen der Westkordillere zu erkennen. Die kristallinen Gesteine der Küstenkordillere weisen dagegen ein Schwererhoch auf.

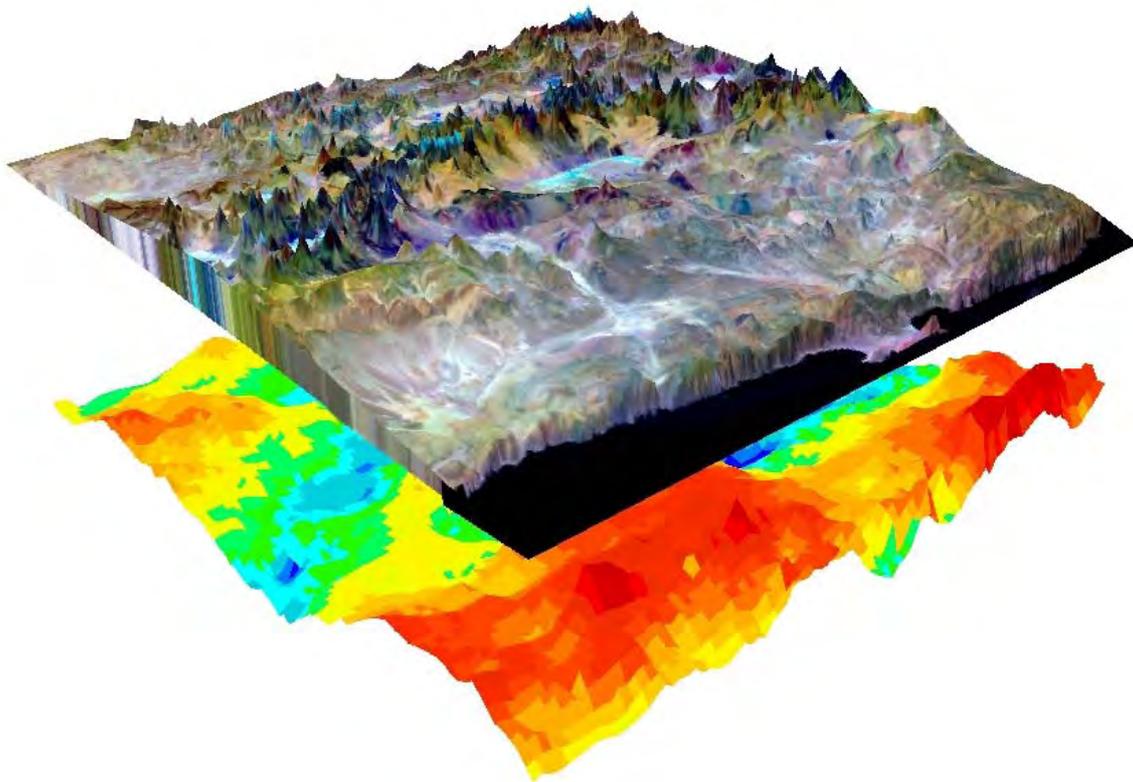


Abb. 2: Perspektivisches Modell dreier Datenebenen des Anden-GIS. Über die isostatistische Schwereanomalie schwebt ein Landsat-Mosaik auf digitalen Höhendaten der Shuttle Radar Topographic Mission. Die Blickrichtung ist von NW nach SE gewählt mit Blick auf die pazifische Küste gewählt.

4. Satellitenbildoptimierung

Die Bildungsbedingungen von Lagerstätten und Lokalisierung charakteristischer Indikatoren sind in einer Reihe von Untersuchungen für die Breitbandspektroskopie in der Fernerkundung beschrieben worden. Auf diesen Kenntnissen aufbauend, können hydrothermale Lagerstätten an alterierten Gesteinen erkannt werden (FRASER, 1991). Durchdringungslagerstätten mit Kupfer sind nach ABRAMS ET AL. (1983) und GOETZ ET AL. (1983) in stark zerklüfteten Gesteinen zu finden. Neuere Untersuchungen beschäftigen sich mit modernen Hyperspektraldaten von Hymap oder AVIRIS. Diese Daten mit bis zu 256 Spektralkanälen werden von Explorationsfirmen eingesetzt. Die Daten sind in der Regel nicht operationell und flächendeckend verfügbar. Natürliche Oberflächen weisen im sichtbaren und infraroten Spektralbereich geglättete spektrale Reflexionskurven auf. In vielen Fällen ist eine hohe Reflexion eines Spektralkanals mit einer hohen Reflexion eines benachbarten Kanals gekoppelt. Die Daten sind hoch korreliert mit einem hohen Grad an Redundanz, wie zum Beispiel die Landsat-TM-Kanäle 1 und 2. Um die Informationsgehalte redundanter Daten zu verbessern, müssen die Grauwerte des kartesischen Merkmalsraumes neu verteilt werden. Diese Umverteilung kann durch eine Berechnung der Hauptkomponenten multispektraler Daten oder mittels Berechnung algebraischer Funktionen erreicht werden. Neben der Hauptkomponentenanalyse wurden verschiedene Ratiobilder zur Akzentuierung alterierter Gesteine und Mineralisationen an ausgewählten Testgebieten andiner Lagerstätten berechnet, um zu prüfen, ob Alterationen mit den eingesetzten Methoden sichtbar werden.

4.1 Hauptkomponentenanalyse (PCA)

In einem zweidimensionalen Merkmalsraum formen normalverteilte Daten eine Ellipse. Die PCA beruht auf einer Neuorientierung und Rotation des multivariaten Merkmalsraumes. Die resultierenden Achsen liegen parallel zu den Achsen der Ellipse. Die Mittelwerte der Grauwertverteilungen werden als neuer Nullpunkt definiert. Die Achse mit der größten Varianz ist die erste Hauptkomponente. Die Achse senkrecht zur größten Varianz ist die zweite Hauptkomponente. Jede Hauptkomponente liegt orthogonal zu der vorherigen. Diese Transformation ändert die Koordinaten im Merkmalsraum und damit die Grauwerte aller Bildpunkte. Dies führt zur Abbildung abstrakter Farben, die keine direkten Rückschlüsse auf das Spektralverhalten der Gesteine erlauben, aber empfindlich auf Vorkommen alterierter Minerale reagieren (Abb.3).

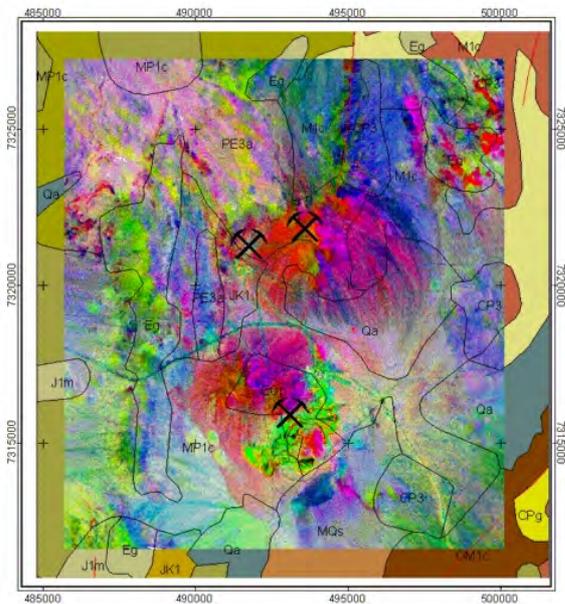


Abb. 3: Hauptkomponentenbild des Landsat-TM zur Lokalisierung von alterierten Gesteinen der Lagerstätte La Escondida in dunklen Grauwerten.

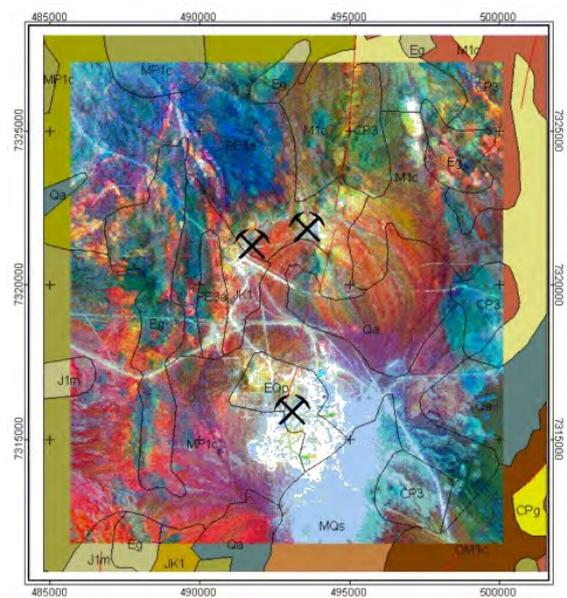


Abb. 4: Rücktransformiertes Hauptkomponentenbild von Landsat-TM zur Akzentuierung alterierter Gesteine in hellen Grauwerten.

4.2 Inverse Hauptkomponentenanalyse (inverse PCA)

Ausgehend von den Hauptkomponenten des Bildes werden die Grauwerte anhand der Varianzen gestreckt und in den RGB-Farbraum rücktransformiert. Die Streckung der Daten erfolgt in zwei Richtungen statt in einer. Das Ergebnis ist eine Erhöhung des Sättigungsanteils und der Intensität mit kräftigen Farben. Spektrale Eigenschaften der Gesteine werden deutlich akzentuiert und ermöglichen eine verbesserte Differenzierung lithologischer Einheiten. Anomale Bereiche alterierter Minerale und Gesteine können bei der Rücktransformation direkt als Zielklassen erkannt und extrahiert werden. Die Abbildung erfolgt als Grauwertbild der rücktransformierten Hauptkomponenten 5, 3, 1 im RGB-Farbraum mit Wiedergabe der Alterationen in hellen Grauwerten (Abb. 4).

4.3 Eisen-Ratiobild (Iron-Ratio)

Die Absorptionsbanden von Eisenmineralen liegen bei 0,35 und 0,5 μm , was dem Spektralbereich des TM-Kanals 1 im blauen Bereich des sichtbaren Spektrums entspricht. Starke Reflexion eisenhaltiger Minerale tritt bei Wellenlängen von 0,65 μm auf. Das entspricht dem TM-Kanal 3 im roten Bereich des sichtbaren Spektrums. Eisen-Ratiobilder (Eisen³⁺-Ratio) der TM-Spektralkanäle 3 und 1 reagieren empfindlich auf geringe Vorkommen eisenhaltiger Minerale, die im Ratiobild als hohe Grauwerte auftreten und sehr gut zu lokalisieren sind. Diese Bereiche sind als ‚Eiserne Hüte‘ Indikatoren für polymetallische Sulfiderzkörper im Untergrund und werden als Zielklassen definiert (Abb. 5).

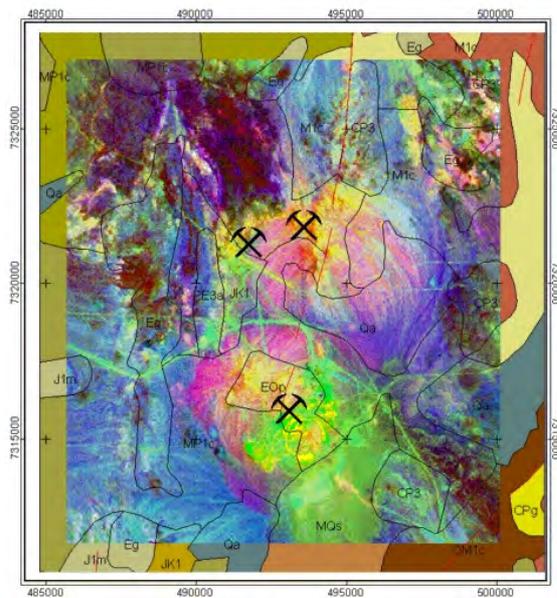


Abb. 5: Einkanaliges Eisen-Ratiobild der TM-Kanäle 3/1 zur Lokalisierung alterierter Gesteine in hellen Grauwerten.

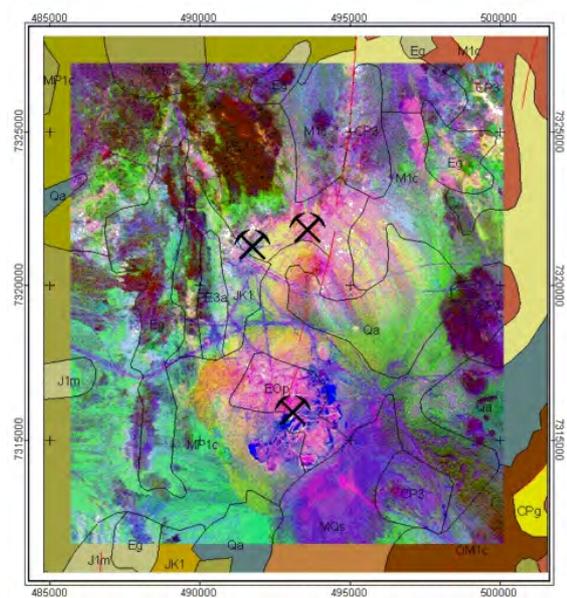


Abb. 6: Einkanaliges Tonmineral-Ratiobild der TM-Kanäle 5/7 zur Lokalisierung alterierter Gesteine in hellen Grauwerten.

4.4 Tonmineral-Ratiobild (Clayband-Ratio)

Die Absorptionsbanden hydroxylhaltiger Minerale mit AL-OH und Mg-OH-Gruppen liegen im Spektralbereich zwischen 2,1 und 2,24 μm . Dieser Bereich wird von dem Landsat-Spektralkanal 7 erfasst. Kanal 5 zeigt dagegen eine hohe Reflexion. Die Ratiobildung von Kanal 5 und Kanal 7 wird als Tonmineral-Ratiobild (Clayband-Ratio) bezeichnet, in dem alterierte Gesteine in hohen Grauwerten auftreten und eindeutig zu lokalisieren sind (Abb. 6).

Die einkanaligen Ratiobilder werden als Ratiofarbkompositenbilder eingelesen. Die Komposite der TM-Kanäle 5/7, 3/1, 4/3 in RGB gibt spektrale Anomalien alterierter Gesteine und Mineralisationen in gelb-goldenen Farben wieder. Diese Ratiokomposite wird als hydrothermales Ratio bezeichnet. Die Ratiokomposite 5/7, 5/4, 3/1 in RGB akzentuiert die Verteilung eisenreicher Minerale und hydrothermal alterierter Gesteine in violett-roten Farben und wird Mineral-Ratio genannt. Die spektralen Anomalien in Verbindung mit bekannten Lagerstätten konnten mit ausgewählten Bildoperationen als Zielklassen verifiziert werden.

In der folgenden Tabelle sind einige der berechneten Bildtransformationen und deren Bewertung zur Visualisierung spektraler Anomalien, hervorgerufen durch alterierte Mineralisationen,

zusammengefasst.

	PCA	Inv. PCA	Hydro-Ratio	Mineral-Ratio	Inv. FFT	Klassifizierung	Materialkartierung
Chuquicamata		Gold	Gold				Diorit
La Escondida	Violett	Gold	Gold	Violett			Diorit
Quebrada Blanca	Violett	Gold	Gold	Violett			Diorit
El Abra			Gold				
Mantos Blancos	Violett	Gelb	Gelb	Violett			
Bewertung	positiv	positiv	positiv	positiv	negativ	lokal positiv	lokal positiv

Tab. 1: Bewertung verschiedener Bildtransformationen an Landsat-TM-Daten zur Lokalisierung alterierter Gesteine mit Kupfer- und Eisenmineralisationen.

Die Tabelle verdeutlicht, dass eine bestimmte Bildtransformation für die fünf Testgebiete nicht immer den gleichen Optimierungseffekt bewirkt. Während für die Kupferimprägnationslagerstätte von Quebrada Blanca alle Bildtransformationen eine signifikante Bildverbesserung bewirkten, ist dies für die Imprägnationslagerstätte von El Abra nicht der Fall. Die Ursache hierfür liegt in der Bildstatistik der jeweiligen Satellitenbilddatenschnitte, da einige Bildoperationen, wie die Hauptkomponentenanalyse (Principal Component Analysis, PCA), eine Gaus'sche Normalverteilung der Grauwerte benötigen. Der Bilddatenschnitt von Quebrada Blanca zeigt eine Gaus'sche Verteilung der Grauwerte. Für das Testgebiet von El Abra mit anomalen spektralen Farben liegt eine trimodale Verteilung vor. Demnach müssen die Histogramme der Satellitenbilddaten durch eine Gaus'sche Streckung in eine Normalverteilung überführt werden, um sinnvolle Ergebnisse der Bildtransformationen zu erzielen.

5. Zielklassenkartierung alterierter Mineralisationen

Die Zielklassenkartierung basiert auf definierten Kriterien und deren Relationen zueinander. Die Ergebnisse der Bildoperationen mit den jeweiligen Zielgebieten werden im GIS extrahiert und mit den anderen Ergebnissen kombiniert. Auf eine differenzierte Gewichtung der Parameter wird verzichtet, da spektrale Anomalien der transformierten Satellitenbilddaten an der Oberfläche dieselbe Wertigkeit besitzen wie magnetische Anomalien des Untergrundes. Die Zielklassifizierung summiert die Kriterien folgender Zielklassenparameter:

- spektrale Anomalien der Hauptkomponentenanalyse (PCA und inverse PCA)
- spektrale Anomalien der Ratiobilder (Hydrothermal-Ratio und Mineral-Ratio)
- Lithologie der Muttergesteine (neogene magmatische Gesteine)
- strukturelle Diskontinuitäten (Störungen, Lineamente)
- magnetische Anomalien (lokale Minima, Anomalientrends).

Die Bewertung erfolgt über die kumulative Summe der sieben Kriterien. Zielgebiete mit einem Wert von fünf und höher müssen im Gelände überprüft werden, da hier die Wahrscheinlichkeit

vorhandener alterierter Gesteine und Mineralisationen sehr groß ist. Ob diese bereits bekannt oder noch unbekannt sind, soll vor Ort mit chilenischen Kollegen geklärt werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Untersuchungen ist es, mögliche Korrelationen zwischen geophysikalischen Anomalien im Untergrund und geologischen Strukturen und Lagerstätten an der Oberfläche zu untersuchen. Die GIS-basierten Analysen werden im Rahmen einer neu entwickelten Strategie für die Prospektion mineralischer Rohstoffe eingesetzt. Im Gegensatz zu bisherigen Strategien werden aus dem Gesamtdatensatz einige bekannte Lagerstätten als Referenzen und Testgebiete extrahiert und die Testdaten mit den verschiedenen Bildverarbeitungstechniken optimiert. Die positiv bewerteten Bildverarbeitungstechniken werden anschließend auf die Gesamtdatensätze angewandt. Die Summe der einzelnen Datenmodellierungen und Interpretationen wird als Zielklassifizierung zur Lokalisierung alterierter Gesteine und Mineralisationen als farbkodierte Karte der berechneten Zielgebiete dargestellt. Dies soll in der zweiten Projektphase erfolgen. Dieser neu entwickelte Ansatz unterscheidet sich von bisherigen Prospektionsstrategien für andine Lagerstätten (BILLA ET AL., 2002).

7. Danksagung

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) möchte ich für die finanzielle Unterstützung zur Durchführung dieses Projektes ganz besonders danken.

Den Partnerinstitutionen in Chile, insbesondere dem chilenischen Servicio Nacional de Geología y Minería, Sernageomin in Santiago de Chile, bin ich für die Einsicht geologischer Daten zu großem Dank verpflichtet. Der University of Maryland (USA) und des Jet Propulsion Laboratory (USA) sei für die Bereitstellung der TM, ETM+ und SRTM Daten gedankt.

Ein ganz besonderer Dank gebührt Herrn Prof. Dr. H.-J. Götze und Frau Dr. S. Schmidt von der Christian-Albrechts-Universität Kiel für die organisatorische Unterstützung und Anregungen zur Datenmodellierung und Interpretation von Potentialfelddaten der Geophysik.

8. Literatur

- ABRAMS, J.; BROWN, D.; LEPLEY, L. & SADOWSKI, R., 1983: Remote sensing for porphyry copper deposits in southern Arizona. - *Econ. Geol.*, **78**, p. 591-604, New Haven, CT.
- ASTUDILL, N.; ROPERCH, P.; TOWNLEY, B.; BELMAR, M. & FAUNDEZ, M., 2003: Effects of hydrothermal alteration on the magnetic properties of rocks: case studies for two porphyry copper deposits of Chile. - Abstract, X. Congreso Geológico Chileno, Concepción, Chile.
- BILLA, M.; CASSARD, D.; GUILLOU-FROTTIER, L.; LIPS, A. & TOURLIERE, B., 2002: Assessment of the GIS Andes: predictive mapping of Neogene goldbearing magmatic-hydrothermal systems in the Central Andes. - In: HERAIL, G., ET AL. (eds.): *Andean geodynamics*. Abstracts, 730 pp. 5. Int. Symposium on Andean geodynamics, Toulouse.
- FRASER, S. J., 1991: Discrimination and identification of ferric oxides using satellite Thematic Mapper data: A Newman case study. - *Int. J. remote sensing*, vol. **12**, 3, p. 635-641, London (Taylor & Francis).
- GOETZ, A. F. H.; ROCK, B. N. & ROWAN, L. C., 1983: Remote sensing for exploration: an overview. - *Econ. Geol.*, **78**, p. 573-590, New Haven, CT.
- JAMES, D. E. & SACKS, I. S., 1999: Cenozoic formation of the Central Andes: A geophysical

- perspective. - In: SKINNER, B. J. (ed.): Geology and ore deposits of the Central Andes. - Soc. Econ. Geol., Spec. Pub., **7**, p. 1-25.
- KAY, S. M.; MPODOZIS, C. & COIRA, B., 1999: Magmatism, tectonism and mineral deposits of the Central Andes (22-33° S latitude). - In: SKINNER, B. J. (ed.): Geology and ore deposits of the Central Andes. - Soc. Econ. Geol., Spec. Pub., **7**, p. 27-59.
- LAMB, S.; HOKE, L.; KENNAN, L. & DEWEY, J., 1997: Cenozoic evolution of the Central Andes in Bolivia and Northern Chile. - In: BURG, J.-P. & FORD, M. (eds.): Orogeny through time. - Geol. Soc., Spec. Pub., **121**, p. 237-264.
- LUCASSEN, F.; BECCHIO, R.; WILKE, H. G.; FRANZ, G.; THIRLWALL, M. F.; VIRAMONTE, J. & WEMMER, K., 2000: Proterozoic-Paleozoic development of the basement of the Central Andes (18-26° S) - a mobile belt of the South American craton. - J. South Am. Earth Sci., **13**, p. 697-715.
- OTT, N., GÖTZE, H.-J., SCHMIDT, S., BURGER, H. & ALTEN, M., 2002: The Meta Geo-information System facilitates use of complex data for study in the Central Andes. - AGU, EOS, Vol. **83**, No. 34, 20. August 2002 (http://www.agu.org/eos_elec/020081e.html).
- OYARZUN, J., 2000: Andean metallogenesis. A synoptical review and interpretation. - Tectonic evolution of South America. Proceedings of the IUGS conference, Rio de Janeiro, p. 725-753.
- Villalpando, A., Lopez-Montaña, R., Miranda, V. & Ibañez, V., 1994: Geologic environment and other features of polymetallic deposits with precious metals in the central and southern parts of the Bolivian Altiplan. - In: German, K., Lehmann, B. & List, F. K., Hrsg. (1994): Festschrift zum 70. Geburtstag von Prof. Dr. H.-J. Schneider. - Berliner geowiss. Abh., (A), **167**, p. 165 - 185, Berlin.

Makhtesh Ramon, Israel – Beispiel einer geologischen Auswertung hyperspektraler Fernerkundungsdaten in ariden Gebieten

JOCHEN BIND¹

In dieser Diplomarbeit sollte die Analysierbarkeit hyperspektraler Fernerkundungsdaten unter geologischen Gesichtspunkten untersucht werden. Der Makhtesh Ramon liegt im Zentrum der Negev-Wüste in Israel und zeigt neben einer kompletten Abfolge triassischer bis kreidezeitlicher Sedimentgesteine zahlreiche magmatische Gesteine und assoziierte Alterationen. Als Datengrundlage dienten Scanner-Daten des DAIS 7915-Sensors im Wellenlängenbereich bis 2500 nm. Die Resultate für den südlich-zentralen Bereich des Makhtesh Ramon zeigen eine gute Übereinstimmung mit der geologischen Karte. Die Ergebnisse für die Verteilung der hydrothermalen Alterationszonen des Har Shen Ramon weichen stark von den bisher publizierten Karten ab. Die hier vorgestellte Revision steht im Einklang mit dem Lowell-Guilbert-Modell für hydrothermale Alterationslagerstätten und Beobachtungen im Gelände.

1 Einführung

Die abbildende Spektrometrie, auch als hyperspektrale Fernerkundung bezeichnet, brachte in den Bereich der Fernerkundung eine neue Stufe der Genauigkeit, welche heute die Unterscheidung multispektral nicht differenzierbarer Materialien bzw. deren Quantifizierung zulässt. Unter dem Begriff der hyperspektralen Fernerkundung versteht man die gleichzeitige Erfassung von Bildern in sehr vielen schmalen, kontinuierlichen spektralen Kanälen (GOETZ ET AL., 1985). Die Aufzeichnung hyperspektraler Daten erfolgt mittels abbildender Spektrometer, die elektromagnetische Energie – gewöhnlich in den sichtbaren bis thermalen Infrarot-Bereichen des Spektrums – in einer großen Anzahl spektraler Kanäle aufzeichnen. Diese Art Sensoren besitzt bis zu 220 Kanäle, was die Erstellung durchgehender Spektren für jedes Bildelement (pixel) der aufgezeichneten Szene ermöglicht (LILLESAND AND KIEFER, 2000).

In ariden Gebieten ist die Vegetationsbedeckung sehr gering, daher können hier die Oberflächenmaterialien annäherungsweise als eine Mischung aus Gesteinen und Böden angesehen werden. Da es sich in beiden Fällen um eine Mischung von Mineralen handelt, lassen sich die Materialien anhand der spektralen Eigenschaften der enthaltenen Minerale charakterisieren. Die Auswertung hoch auflösender Reflektionsspektren wird seit Jahren erfolgreich als preiswerte und effektive Methode zur Bestimmung der Mineralzusammensetzung auf der Erdoberfläche angewandt (z.B. KRUSE ET AL., 1990; CROWLEY, 1993).

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Anwendung hyperspektraler Daten zur geologischen Auswertung eines ariden Gebietes. Ziel war die Überprüfung des Potentials der hyperspektralen Fernerkundung für die Erstellung einer geologischen Karte mit einem Minimum an nötiger Geländearbeit (im Idealfall ohne jegliche Geländearbeit) und für die Charakterisierung hydrothermalen Alterationszonen.

¹ Jochen Bind, GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ), Sektion 1.4, Telegrafenberg, 14473 Potsdam, e-mail: jobind@gfz-potsdam.de

2 Untersuchungsgebiet



Abb. 1: Lage
Makhtesh Ramon

Der Makhtesh Ramon ist ein etwa 40 km langes, 9 km breites und 400 m tiefes Tal und liegt im Zentrum der Negev-Wüste im südlichen Israel (Abb. 1). Die Bezeichnung *makhtesh* stammt vom hebräischen Wort für Mörser und beschreibt weltweit Landschaftsformen, bei denen ein elliptisches Tal durch die fluviatile Erosion einer Antiklinale entstanden ist. Der Makhtesh Ramon, der größte *makhtesh* der Welt, ist einer von fünf *makhteshim* in der Negev-Wüste.

Aus geologischer Sicht ist der Makhtesh Ramon in verschiedener Hinsicht ideal für Forschungszwecke. Die Aufschlussverhältnisse sind aufgrund des ariden Klimas und der spärlichen Vegetation außerordentlich gut und es existiert eine Vielfalt verschiedener Lithologien von Sedimentgesteinen bis zu magmatischen Gesteinen. Zudem ist von der Trias (~200 Ma) bis zur Oberen Kreide (~70 Ma) eine kontinuierliche Sequenz aufgeschlossen (MAZOR, 1993), die im östlichen Mittelmeerraum nur selten zu finden ist.

Der Makhtesh Ramon wird vom erodierten Kern der Ramon Antiklinale gebildet. Durch unterschiedliche Heraushebungs- und Erosionsraten entstand ein asymmetrisches Tal, dessen Nordwestflanke von Absätzen subhorizontal gelagerter und dessen Südostwand von steil aufgestellten Karbonatschichten gebildet wird. Im Südosten wird das Tal von der Ramon-Störung begrenzt. Während an den Talrändern erosionsresistente Karbonate und detritische Sandsteine vorkommen, wird der Talboden überwiegend von Gips gebildet. Daneben sind innerhalb des Tales eine Vielzahl kreidezeitlicher, vulkanischer In- und Extrusiva überliefert. Neben einer Fülle von Dikes sind besonders der andesitische Ramon Laccolith und der syenitische Har Shen Ramon von Bedeutung, die beide während des Juras intrudierten. Durch die Intrusion der Syenite des Har Shen Ramon bildeten sich Zonen hydrothermaler Alteration im umgebenden Gestein aus, in denen gewöhnlich Erzanreicherungen gefunden werden können.

3 Datenaufzeichnung und Datengrundlage

Das Digital Airborne Imaging Spectrometer (DAIS 7915) ist ein optisch-mechanischer Scanner, der in insgesamt 79 Kanälen elektromagnetische Energie in den Wellenlängenbereichen des sichtbaren Lichts (VIS), nahen (NIR), kurzwelligen (SWIR), mittleren (MIR) und thermalen (TIR) Infrarots aufzeichnet. Er besteht aus 4 separaten Spektrometern, die den Bereich von 400 nm bis 12600 nm abdecken (CHANG ET AL., 1993). Die Bodenauflösung (GIFOV) des Sensors beträgt je nach Flughöhe 5 bis 15 m.

Im Rahmen der vom DLR durchgeführten Befliegungskampagne in Israel 1997 wurden am 1.8.1997 zwei Streifen über dem Makhtesh Ramon geflogen. Die Befliegung erfolgte in einer Höhe von 3050 m über der Geländeoberfläche, was in einer Bodenauflösung von ca. 4 m resultiert. Für die Analyse wurden nur Kanäle des sichtbaren Lichts (VIS) bis kurzwelligen Infrarot (SWIR II) verwendet. Für diese Untersuchung wurde ein wolkenfreier Ausschnitt des südlichen Flugstreifens ausgewählt, der die geologisch interessantesten Gebiete enthält. Im bearbeiteten Ausschnitt sind die Alterationszonen des Har Shen Ramon und die gesamte Stratigraphie des Makhtesh Ramon mit ihren verschiedenen lithologischen Einheiten enthalten.

Zusätzlich zu den Flugzeugscanner-Daten wurden im Sommer 1998 Geländespektren mit einem ASD-Geländespektrometer aufgenommen. Als Grundlage zur Bewertung der Ergebnisse sowie zur Beurteilung der Mischkomponentenauswahl diente die geologische Karte des Makhtesh Ramon im Maßstab von 1:20.000 von ZAK (1968). Zur Beurteilung der Ergebnisse im Bereich des Har Shen Ramon diente eine detailliertere Karte von ITAMAR AND BAER (1993).

4 Methodik

Die Auswertung erfolgte in zwei Schritten. Zunächst wurden die Daten per Rausch- (*Minimum Noise Fraction*-Transformation) und Atmosphärenkorrektur (*Empirical Line*-Methode) vorprozessiert, bevor die eigentliche Analyse der Bilddaten erfolgte. Die Behandlung zur Rauschverminderung war notwendig, da die Rohdaten sehr starke Rauschkomponenten im – für die geologische Auswertung sehr wichtigen – Bereich des SWIR II aufwiesen.

Das Ziel einer (geologischen) Analyse hyperspektraler Daten ist meistens eine Identifizierung der an der Geländeoberfläche vorkommenden Minerale und die quantitative und qualitative Analyse ihrer Verteilung. Hierbei kann man zwei Ausgangs-Szenarien unterscheiden, die in der Datenauswertung verschiedene Vorgehensweisen erfordern. Beim ersten Fall liegen keine a priori-Informationen vor und im ersten Schritt der Analyse müssen die in den Daten unterscheidbaren Materialien erst identifiziert werden, bevor weitere Untersuchungen durchgeführt werden können. Im zweiten Fall liegen bereits Geländeinformationen (z.B. geologische Karten) und gegebenenfalls sogar spektrale Geländemessungen vor. In diesem Fall geht es hauptsächlich um die Bestimmung der räumlichen Verteilung bekannter Minerale. Es wurden Analysen unter Berücksichtigung beider Ansätze durchgeführt und die Ergebnisse miteinander verglichen.

4.1 Auswertung ohne Geländeinformationen

Die Auswertung ohne Geländeinformationen erfolgte gemäß den von KRUSE AND HUNTINGTON (1996) beschriebenen Methoden. Im ersten Schritt geht es um die Identifikation der Hauptbestandteile (Endmember), aus denen sich die Oberfläche zusammensetzt. Die Genauigkeit und Verlässlichkeit der anschließenden qualitativen und quantitativen Analysen hängt primär von der Qualität und Vollständigkeit dieser Endmember ab.

Zunächst wird die spektrale Dimensionalität mit der *Minimum Noise Fraction*-Transformation (MNF) reduziert (GREEN ET AL., 1988). Im nächsten Schritt werden die spektral reinsten Pixel durch die Berechnung des *Pixel Purity Indexes* (PPI) ermittelt (BOARDMAN ET AL., 1995).

Nachdem die zu analysierende Daten auf diese Weise sowohl spektral (Anzahl der Kanäle oder Dimensionen), als auch räumlich (Anzahl der Pixel) auf ein Minimum reduziert wurden, findet die Auswahl der Endmember als interaktiver Prozess durch den Analytisten statt. Hierzu werden die Spektren der zu begutachtenden Pixel als n-dimensionale Punktwolke dargestellt, die sich in Echtzeit in jede Dimension rotieren lässt. In dieser Wolke müssen nun Pixelgruppen in Extrempositionen, die laut Definition die enthaltenen Endmember darstellen, identifiziert werden.

Die Analyse der räumlichen Verteilung der Endmember erfolgte mittels spektraler Entmischung. Das hier verwendete *Linear Spectral Unmixing* LSU (ADAMS ET AL., 1985) gehört zu

den Ansätzen zur vollständigen Entmischung, d.h. alle vorkommenden Endmember müssen bekannt sein, da das beobachtete Signal als lineare Mischung aller Endmemberspektren erklärt wird.

4.2 Auswertung unter Zuhilfenahme von Geländeinformationen

Vom Gebiet des Makhtesh Ramon lagen für diese Arbeit Geländespektren der meisten stratigraphischen Einheiten sowie der verschiedenen Alterationszonen des Har Shen Ramon vor. Des Weiteren lag die geologische Karte des südlichen Makhtesh Ramon (ZAK, 1968) im Maßstab 1 : 20 000 vor, mit deren Hilfe die einzelnen stratigraphischen Einheiten in den Bilddaten identifiziert wurden, und eine Detailkarte des Har Shen Ramon von ITAMAR AND BAER (1993). Die Auswahl der Endmember erfolgte basierend auf diesen Informationen. Endmemberspektren wurden als Mittelwertspektren für alle stratigraphischen Einheiten bestimmt.

5 Ergebnisse

Es wurden getrennte Analysen für zwei Gebiete durchgeführt. Zum einen wurde der südlich-zentrale Bereich des Makhtesh Ramon, der einen großen Teil des Flugstreifens ausmacht, untersucht. Zum anderen wurde ein Ausschnitt davon – der Alterationsbereich des Har Shen Ramon – separat bearbeitet.

5.1 Spektrale Analyse der Endmember

Die Spektren der beim datengestützten Ansatz identifizierten Endmember sind in Abb. 2 für sedimentäre und in Abb. 3 für magmatische, bzw. alterierte Endmember dargestellt.

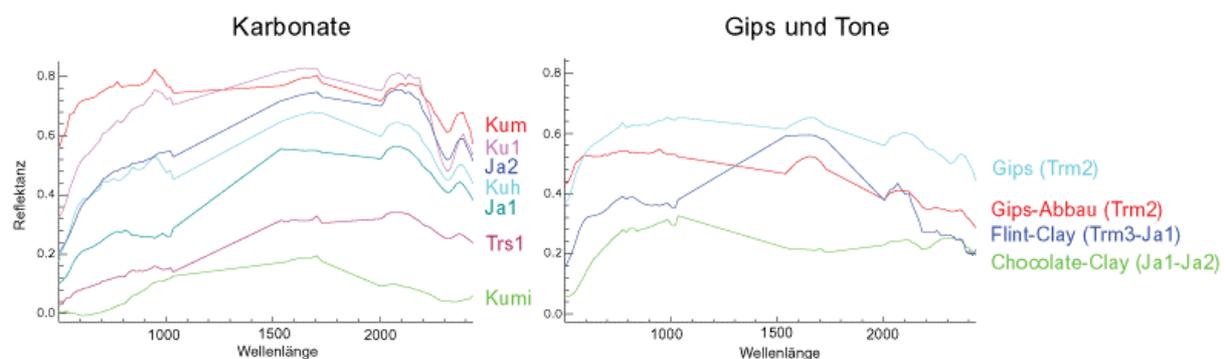


Abb. 2: Aus Hyperspektraldaten bestimmte sedimentäre Endmember

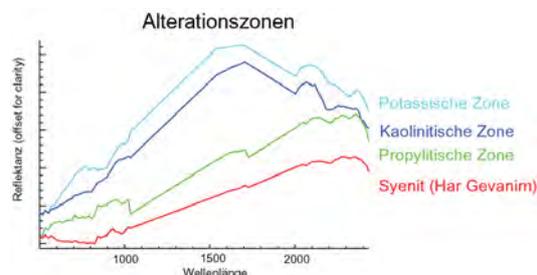


Abb. 3: Aus Hyperspektraldaten bestimmte Alterations-Endmember

Es lässt sich leicht erkennen, dass sich sowohl die meisten sedimentären Einheiten, als auch alle Alterationszonen durch reine datengestützte Endmemberauswahl trennen lassen. Es ist jedoch nicht möglich, in der datenbasierten Analyse alle stratigraphischen Einheiten als Endmember zu identifizieren. Besonders in den karbonatischen Einheiten mit niedriger Albedo konnte auf Datenbasis nur wenige Endmember identifiziert werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der PPI für diese Einheiten keine „reinen“ Pixel lieferte, was zum Teil in der Tatsache begründet ist, dass in Gebieten niedriger Albedo das Signal-Rausch-Verhältnis stark reduziert ist und somit schon ein mittleres Rauschen zu stark variablen Reflektionsspektren führen kann.

5.2 Resultate der spektral-analytischen Auswertung

Es muss darauf hingewiesen werden, dass die Interpretation der Ergebnisse ausschließlich auf Basis der geologischen Karte von ZAK (1968) für die Übersicht und von ITAMAR AND BAER (1993) für das Gebiet des Har Shen Ramon sowie der spektralen Informationen erfolgt. Da der Autor selbst keine Geländearbeit im Makhtesh Ramon durchgeführt hat, ist eine qualitative Bewertung der Resultate nur auf dieser Basis möglich.

Die durch die in Kapitel 4 beschriebenen Methoden extrahierten Endmemberspektren wurden als Eingabeparameter für eine spektrale Entmischung der DAIS 7915-Daten verwendet. Zur Analyse des südlich-zentralen Makhtesh Ramons wurden sowohl die Endmember der sedimentären Einheiten, als auch der Alterationszonen hinzugezogen. Für die gesonderte Bearbeitung der Alterationszonen des Har Shen Ramon wurde eine verfeinerte Auswahl von Endmemberspektren erstellt, um eine höchstmögliche Genauigkeit zu erzielen.

5.2.1 Analyse des südlich-zentralen Bereichs des Makhtesh Ramon

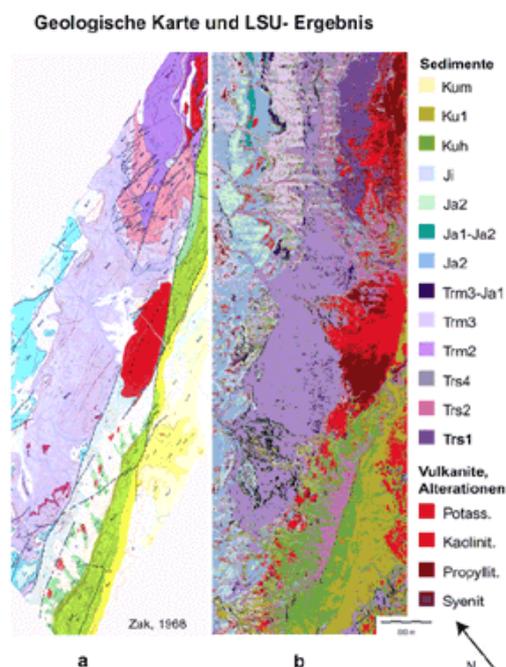


Abb. 4: Geologische Karte und Ergebnis der hyperspektralen Auswertung

Im Analysebereich des südlich-zentralen Makhtesh Ramon ist die gesamte Stratigraphie des Makhtesh Ramon mit ihren verschiedenen lithologischen Einheiten vertreten. Die meisten sedimentären Gesteine sind karbonatisch, doch es existieren auch Kaolinit-haltige Bereiche und eine in großen Bereichen aufgeschlossene Gips führende Einheit.

In Abb. 4 ist die geologische Karte neben dem Ergebnis des LSU mit Endmembers aus einer Auswahl unter Berücksichtigung von Zusatzinformationen dargestellt. Die rein datengestützte Auswertung zeigte ein sehr ähnliches Ergebnis, die Unterschiede werden im Text erwähnt.

Im unteren Bildbereich sind die beiden kreidezeitlichen Einheiten (Kuh und Ku1) mit allen Verfahren gut trennbar. Es ist stets eine scharfe Grenze erkennbar, deren Position und Verlauf mit der geologischen Karte im Einklang steht. Auch die Verteilung der Gips führenden Einheit (Trm2)

innerhalb der Mohila-Formation ist in allen Ergebnissen klar zu erkennen und zeigt eine große Übereinstimmung mit der geologischen Karte. Die guten Resultate der Analysen sind darauf zurückzuführen, dass sich die spektralen Eigenschaften dieser Einheit sehr stark von den Merkmalen der übrigen Endmember unterscheiden. Zwei weitere Einheiten, die sich stark vom überwiegenden Teil der im Bildausschnitt vorkommenden Lithologien unterscheiden, sind die Kaolinit führenden Schichten des *Flint Clay* (Trm3-Ja1) und *Chocolate Clay* (Ja1-Ja2). Eine gute Identifikation dieser beiden Einheiten konnte trotz ihrer niedrigen Albedo-Werte erwartet werden, da sie eine – in den restlichen Sedimenten nicht anzutreffende – starke Absorption um 2200 nm zeigen. Obwohl beide Schichten nur sehr geringmächtig sind, lassen sich die Einheiten in den Ergebnissen klar ausmachen. Die in den Ergebnissen erkennbare Verteilung suggeriert jedoch relativ große Mächtigkeiten, besonders beim *Chocolate Clay*. Dieser Effekt wird durch die Verwitterung und damit verbundenen Verteilung der Tonminerale in der näheren Umgebung hervorgerufen.

Problematisch sind bei der rein datengestützten Analyse vor allem inhomogene stratigraphische Einheiten. So konnten beim rein datengestützten Ansatz die stratigraphischen Einheiten Trm3 der Mohila-Formation und die älteren Schichten der Saharonim-Formation (Trs2-Trs4), die sich durch eine starke Inhomogenität auszeichnen, durch eine reine Analyse der spektralen Merkmale nicht als Endmember bestimmt werden. In der in Abb. 4 abgebildeten Auswertung wurden diese Einheit durch mehrere gezielt bestimmte Endmember repräsentiert, die als Eingabe für das *Linear Spectral Unmixing* dienten. In der rein datengestützten Auswertung konnten diese Einheiten keiner stratigraphischen Gruppe zugeordnet werden.

5.2.2 Analyse des Ausschnitts Har Shen Ramon

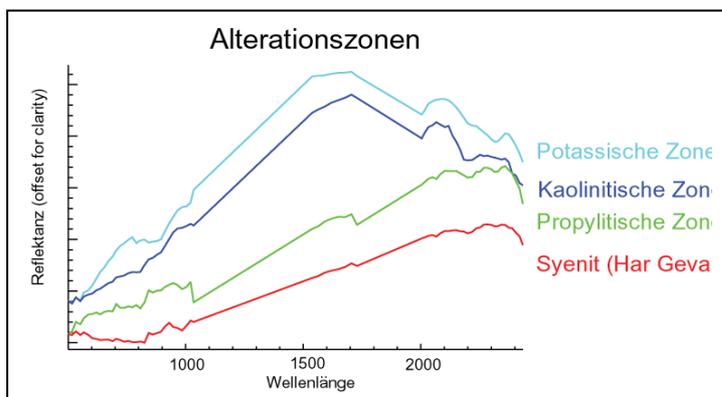


Abb. 5: Alterationsmodell und veröffentlichte Alterationszonen des Har Shen Ramon

Am Südrand des Makhtesh Ramon sind eine Reihe quarz-syenitischer Intrusivkörper abgeschlossen. Der Har Shen Ramon ist für diese Arbeit von besonderem Interesse, da hier hydrothermal alterierte Brekzienzonen beobachtet werden können (ITAMAR AND BAER, 1993). Hydrothermale Alterationszonen sind speziell in der Lagerstättenprospektion von Bedeutung, da sich in bestimmten Bereichen häufig Erzanreicherungen in abbauwürdigen Konzentrationen finden lassen. Laut ITAMAR AND BAER (1993) können im Har Shen Ramon drei Zonen unterschiedlich starker Alteration unterschieden werden.

In Abb. 5 ist das Modell einer typischen Alterationsabfolge nach LOWELL UND GUILBERT (1970) und die veröffentlichte Detailkarte der Alterationszonen im Har Shen Ramon von ITAMAR AND BAER (1993) dargestellt. Im Har Shen Ramon wurden argillitische und phyllitische Zone zur kaolinitischen Zone zusammengefasst. Auf der Karte von ITAMAR AND BAER (1993) bildet diese kaolinitische Zone das Zentrum der Alteration, was jedoch im direkten

Widerspruch zum links dargestellten, weithin akzeptierten Alterationsmodell von LOWELL UND GUILBERT (1970) steht.

Das Ergebnis der Auswertung der DAIS 7915-Daten (siehe Abb. 6) steht hingegen im Einklang mit dem Lowell-Guilbert-Modell. Der südwestliche und nördliche (äußere) Bereich wird von der propylitischen Zone gebildet. Als Zone nächsthöherer Alteration folgt die kaolinitische Zone im Kontakt zum propylitischen Bereich. Der zentrale Bereich im Südosten wird von der potassischen Zone gebildet. Wie auf der Darstellung zu erkennen ist, lassen sich die einzelnen Zonen nicht klar voneinander abgrenzen. Die kaolinitische Zone zeichnet sich spektral jedoch stets durch eine starke Ausprägung der Absorption um 2200 nm aus, während diese in der potassischen Zone nicht oder nur angedeutet zu erkennen ist. Wenn man die Ergebnisbilder der hyperspektralen Analyse generalisiert, ergibt sich eine dem Lowell-Guilbert-Modell analoge Zonierung. Die vorgestellten Analyseergebnisse werden auch durch Gelände-beobachtungen und -fotos untermauert.

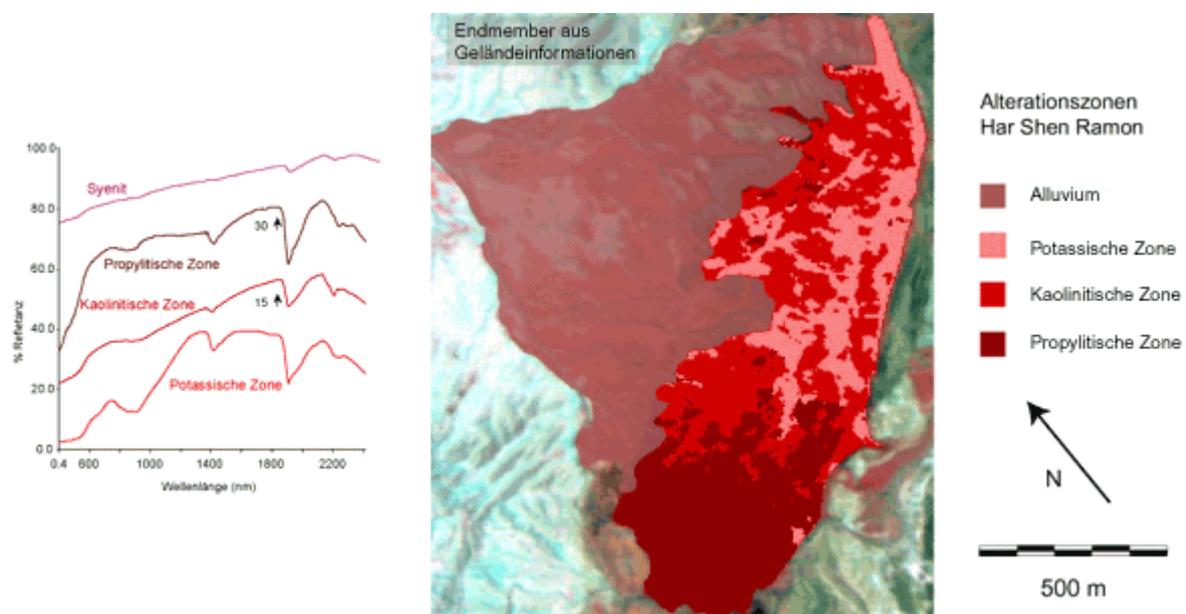


Abb. 6: Analyseergebnisse Har Shen Ramon und Laborspektren der einzelnen Alterationszonen

Problematisch bei der hyperspektralen Auswertung ist die Durchsetzung des Har Shen Ramons mit kaolinitisierten Dikes. Diese häufig anzutreffenden Vorkommen von Kaolinit erschweren die exakte Differenzierung der potassischen und kaolinitischen Zonen besonders in Regionen mit niedriger Albedo und schwachem spektralem Signal.

6 Fazit

Die Untersuchungen wurden hinsichtlich einer rein datenbasierten Auswertung und einer Auswertung unter Berücksichtigung vorhandener geologischer Informationen durchgeführt. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse verdeutlicht, dass auch bei einer rein datenbasierten Auswertung sehr genaue Ergebnisse hinsichtlich der Verteilung einzelner lithologischer Einheiten erzielt werden können. Die Ergebnisse der geländebasierten Auswertung sind besonders in Bereichen inhomogener stratigraphischer Einheiten oder Bereichen niedriger Albedo mit daraus resultierendem herabgesetztem Signal-Rausch-Verhältnis den datenbasierten Ergebnissen überlegen.

Im Har Shen Ramon kann eine potassische, eine kaolinitische und eine propylitische Zone nachgewiesen werden. Die Verteilung dieser Zonen lässt sich mit fernerkundlichen Methoden erfassen. Die in dieser Arbeit postulierte Verteilung der Alterationszonen steht im Einklang mit dem Lowell-Guilbert-Modell hydrothermaler Alterationen und widerlegt die bisher auf Detailkarten des Har Shen Ramon dargestellte Zonierung.

7 Literaturverzeichnis

- ADAMS, J.B., SMITH, M.O., AND JOHNSTON, P.E., 1985: Spectral Mixture Modelling: A New Analysis of Rock and Soil Types at the Viking Lander 1 Site. *Journal of Geophysical Research*, **91**, S. 8098-8112
- BOARDMAN, J.W., KRUSE, F.A., AND GREEN, R.O., 1995: Mapping Target Signatures via Partial Unmixing of AVIRIS Data. In: *Summaries of the Fifth JPL Airborne Geoscience Workshop*, JPL Publication **95-1/1**, S. 23-26
- CHANG, S., WESTFIELD, M.J., LEHMANN, F., OERTEL, D., AND RICHTER, R., 1993: A 79-Channel Airborne Imaging Spectrometer. *SPIE*, **1937**, S. 164-172
- CROWLEY, J.K., 1993: Mapping Playa Evaporite Minerals with AVIRIS Data: A First Report From Death Valley, California. *Remote Sensing of Environment*, **44/2-3**, S. 337-356
- GOETZ, A.F.H., VANE, G., SOLOMON, J.E., AND ROCK, B.N., 1985: Imaging Spectrometry for Earth Remote Sensing. *Science*, **228**, S. 1147-1153
- GREEN, A.A., BERMAN, M., SWITZER, P., AND CRAIG, M.D., 1988: A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **26/1**, S. 65-74
- ITAMAR, A., AND BAER, G., 1993: Polymetallic Mineralization Related to Magmatic and Contact Metasomatic Features, Southern Makhtesh Ramon, Israel. *Israel Journal of Earth Sciences*, **42/3-4**, S. 149-163
- KRUSE, F.A., KIEREIN-YOUNG, K.S., AND BOARDMAN, J.W., 1990: Mineral Mapping at Cuprite, Nevada, with a 63 Channel Imaging Spectrometer. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **56/1**, S. 83-92
- KRUSE, F.A., AND HUNTINGTON, J.H., 1996: The 1995 Geology AVIRIS Group Shoot. In: *Proceedings of the Sixth JPL Airborne Earth Science Workshop*, JPL Publication **96-4/1**, S. 155-166
- LILLESAND, T.M., AND KIEFER, R.W., 2000: *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons. Ltd., New York
- LOWELL, J.D., AND GUILBERT, J.M., 1970: Lateral and Vertical Alteration Mineralization Zoning in Porphyry Ore Deposits. *Economic Geology*, **65**, S. 373-408
- MAZOR, E., 1993: Introduction to the Ramon National Park. *Israel Journal of Earth Science*, **42/3-4**, S. 103-114
- ZAK, I., 1968: Geologic Map of Israel Makhtesh Ramon, Har Gevanim, 1:20 000 Scale, Geological Survey of Israel, Jerusalem

HRSC auf Mars Express - Photogrammetrische Datenverarbeitung im planetaren Umfeld

FRANK SCHOLTEN¹, KLAUS GWINNER¹, BERND GIESE¹, JÜRGEN OBERST¹,
THOMAS ROATSCH¹, RALF JAUMANN¹, GERHARD NEUKUM² und das HRSC-TEAM

Zusammenfassung: Die Rahmenbedingungen interplanetarer Raumfahrt-Missionen stellen besondere Anforderungen an die photogrammetrische Verarbeitung der dabei gewonnenen Bilddaten dar. Für die Verarbeitung der Daten der HRSC (High Resolution Stereo Camera) an Bord der aktuellen Mission Mars Express konnte auf die mehrjährigen Erfahrungen aus dem flugzeuggestützten Einsatz der HRSC aufgebaut, die Verarbeitungsmethoden an die planetaren Bedingungen angepasst und somit ein leistungsfähiges und flexibles photogrammetrisches Prozessierungssystem entwickelt und nun eingesetzt werden. Innerhalb des HRSC-Teams erfolgt eine entsprechend der jeweiligen Projektaufgaben koordinierte Zusammenarbeit, die nach einer missionspezifischen Vorverarbeitung die Generierung der photogrammetrischen Produkte und deren Visualisierung bis hin zur Animation von simulierten Überflügen ermöglicht.

1 Einleitung

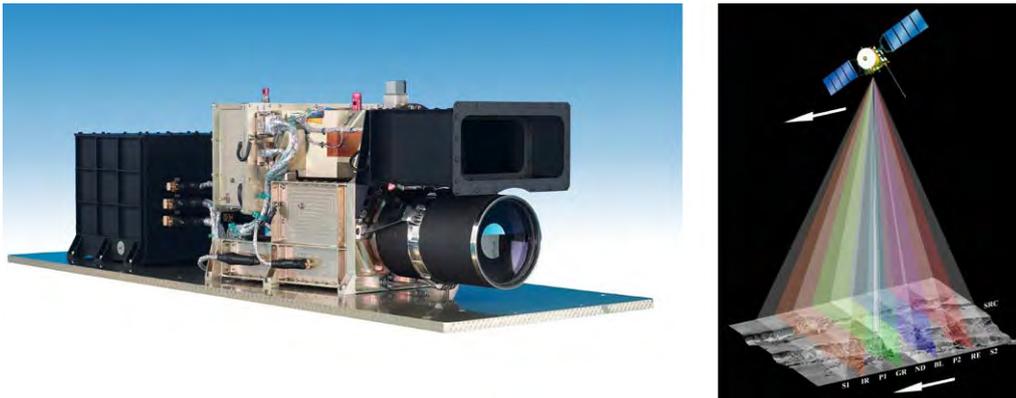


Abb. 1: HRSC auf Mars Express

Nach einem erfolgreichen Start im Juni 2003 und einem reibungslosen Transfer zum Planeten Mars befindet sich die europäische Raumsonde Mars Express seit dem Januar 2004 im Orbit um unseren Nachbarplaneten. Die unter der Leitung des Principal Investigators (PI) Professor Dr. GERHARD NEUKUM am DLR entwickelte und für die Mars Express Mission vom Experiment Team am DLR Institut für Planetenforschung in Berlin-Adlershof in Abstimmung mit dem PI und der ESA betriebene High Resolution Stereo Camera (HRSC), Abb. 1, liefert seitdem Bilddaten der Marsoberfläche in bisher nicht bekannter Qualität.

¹ Dipl.-Ing. Frank Scholten, Dipl.-Geol. M.A. Klaus Gwinner, Dr. Bernd Giese, Dr. Jürgen Oberst, Dr. Thomas Roatsch, Dr. habil. Ralf Jaumann, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Planetenforschung, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin, e-mail: Frank.Scholten@dlr.de

² Prof. Dr. Gerhard Neukum, Freie Universität Berlin, Institut für Geologische Wissenschaften, Fernerkundung der Erde und der Planeten, Malteserstr. 74-100, 12249 Berlin, e-mail: gneukum@zedat.fu-berlin.de

Mit HRSC auf Mars Express kommt erstmals in der Planetenforschung eine Kamera zum Einsatz, bei deren Entwicklung besonderer Augenmerk auf die spätere photogrammetrische Auswertung der Bilddaten gelegt wurde. Ziel des Kamera-Experiments HRSC ist die Erkundung des Planeten mit Hilfe hochauflösender multispektraler Bildinformation bei gleichzeitiger dreidimensionaler Erfassung der Oberflächenform.

Das Konzept, die HRSC für den Einsatz im Rahmen einer Mars-Mission zu entwickeln und einzusetzen, wurde der photogrammetrischen Fachwelt von Prof. NEUKUM bereits 1988 auf der DGPF-Jahrestagung in Friedrichshafen vorgestellt. Einen Überblick über das HRSC-Kameraexperiment, das auf dem bekannten Mehrzeilen-Prinzip basiert und bei HRSC mit 5 Stereozeilen sowie 4 Spektralkanälen (Abb. 2) realisiert ist, bieten NEUKUM ET AL. (1995) sowie NEUKUM ET AL. (2004).

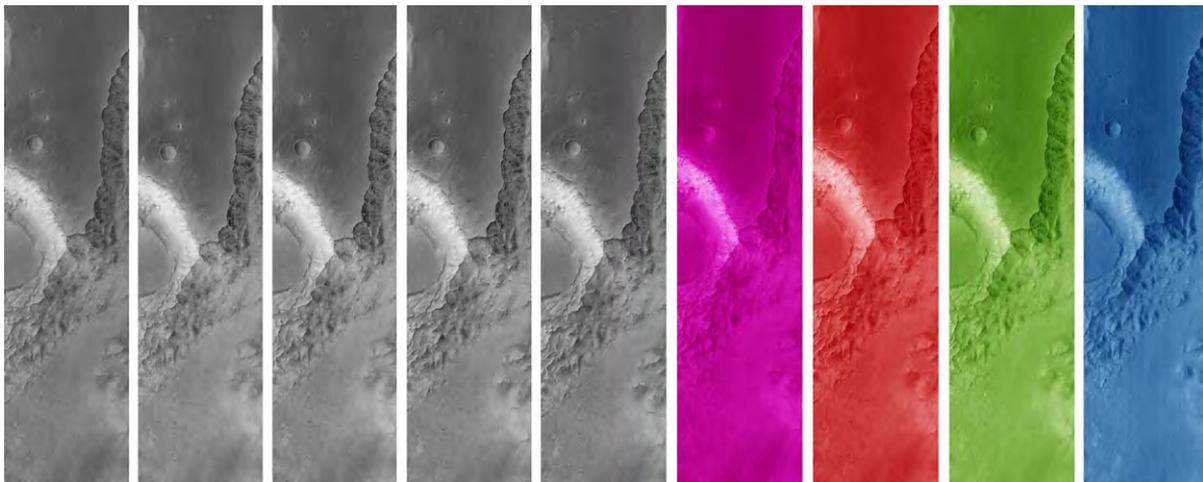


Abb. 2: HRSC: 5 Stereokanäle (+18,9°, +12,8°, 0°, -12,8°, -18,9°) sowie 4 Spektralkanäle (Nahes Infrarot, Rot, Grün, Blau)

2 Mars Express im Orbit um den Roten Planeten

Nach der sogenannten Commissioning Phase, in der der Mars Express Orbiter und die auf ihm befindlichen Instrumente eingerichtet wurden und in der bereits ca. 10 % der Marsoberfläche erfasst werden konnten, befindet sich HRSC auf Mars Express im Rahmen der eigentlichen Missionsphase (ab Juni 2004) in einer elliptischen Bahn um den Planeten Mars. Der marsnächste Punkt (Periapsis) liegt dabei bei 250 km, der marsfernste Punkt (Apoapsis) bei ca. 10100 km. Die Orbitperiode beträgt ca. 7,5 Stunden, die Inklination 87°.

Seit dem Beginn der HRSC-Datenaufzeichnung am 9. Januar werden die **HRSC-Bilddaten** zunächst in komprimierter Form (JPEG-Komprimierung, Kompressionsfaktor ca. 5-8) auf einem Massenspeicher an Bord abgelegt und später zur Erde übertragen. Im Rahmen der systematischen Bodendatenverarbeitung am DLR werden diese Daten zunächst dekomprimiert, radiometrisch korrigiert und einzelne Datensätze je Bildstreifen und HRSC-Sensorzeile separiert und mit jeweiliger Zeitanbindung abgelegt.

Als **Daten der äußeren Orientierung** dienen einerseits Orbitinformationen als **Positionsdaten**, die zunächst aus der Missionsplanung heraus a priori verfügbar sind und durch Tracking-Verfahren von der Erde aus verbessert werden. Andererseits liefern die a priori definierten Spacecraft/Kamera-Pointing bereits sehr gute **Lagedaten**. Bereits in der Commissioning Phase hat sich gezeigt, dass die geplante Ausrichtung des Orbiters zur Marsoberfläche mit Hilfe

von Beobachtungen durch Sternensensoren sowie daraus abgeleiteter Steuerungsmaßnahmen an Bord von Mars Express mit hoher Genauigkeit eingehalten werden kann.

2 Komponenten der photogrammetrischen Verarbeitung

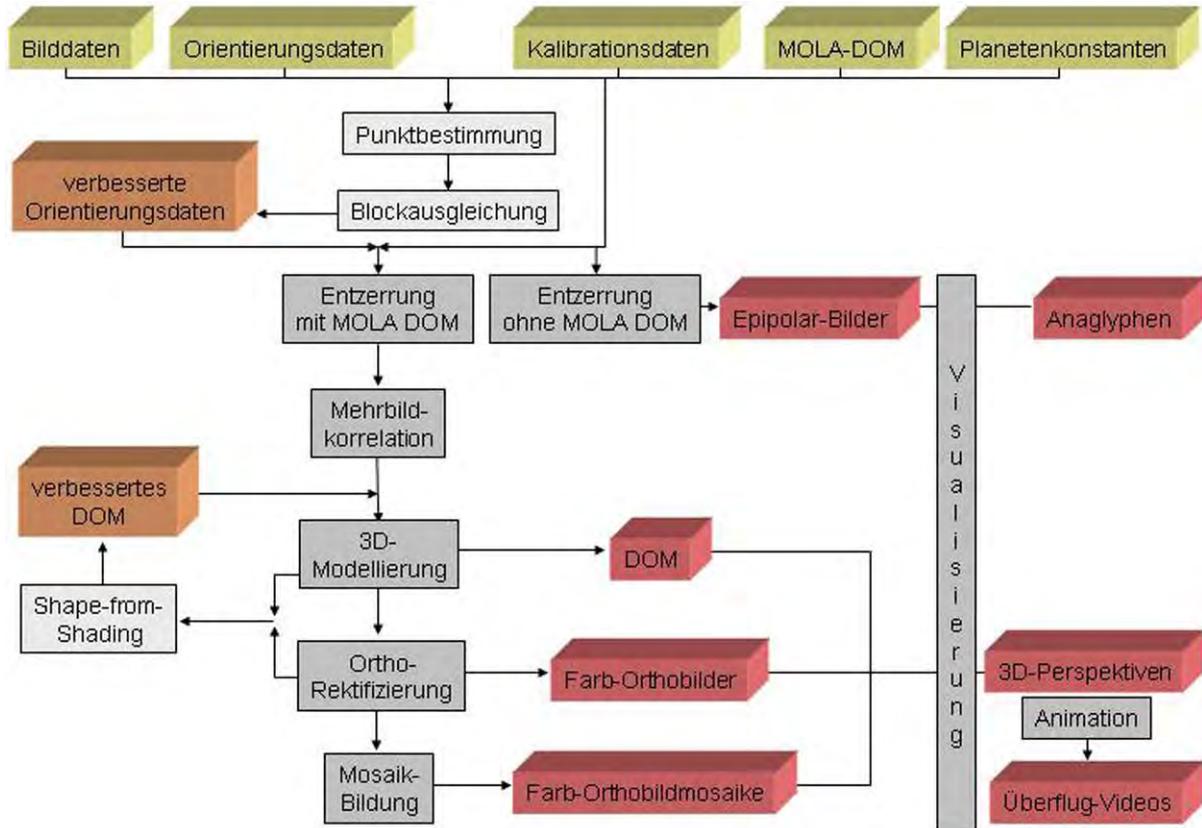


Abb. 3: Photogrammetrische Verarbeitung von Mars Express HRSC-Daten

Für die photogrammetrische Datenverarbeitung (Abb. 3) liegen zu den systematisch vorprozessierten Bilddaten und den Orientierungsdaten für jede HRSC-Bildzeile geometrische Labor-Kalibrierungsdaten als **Daten der inneren Orientierung** vor, die neben der Brennweite der HRSC die Lage jedes CCD-Elements aller 9 HRSC-Zeilen in der nominellen Fokalebene exakt beschreiben. Darüber hinaus dient das aus Daten der US-amerikanischen Mars Global Surveyor mit dem **Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA)** generierte **Mars-Oberflächenmodell** als Initial-Topographie für die HRSC-Datenverarbeitung, innerhalb derer dieser, insbesondere in äquatornahen Gebieten, lückenhafte Datensatz des MOLA-Experiments verbessert und verdichtet werden wird. Für die Datenprodukt-Generierung stehen zuletzt noch international standardisierte **Planetenkonstanten** (Referenzellipsoid) zur Verfügung.

Somit liegen alle notwendigen Daten für die weitere photogrammetrische Verarbeitung vor. Im weiteren ist dabei zwischen zwei Verarbeitungstypen zu unterscheiden. Dies sind einerseits die **operationelle Verarbeitung zur möglichst zeitnahen Generierung von standardisierten photogrammetrischen Datenprodukten** (Digitale Oberflächenmodelle, Orthobildern) sowie von 3D-Visualisierungen.

Andererseits werden im Rahmen von weiteren wissenschaftlichen Untersuchungen die zu- meist zeitaufwendigere **Anwendung experimenteller Verfahren mit dem Ziel einer möglichen Produktoptimierung** mit Hilfe adaptiver und analyse-intensiverer Verfahren erprobt.

2.1 Operationelle photogrammetrische HRSC-Datenverarbeitung

Um möglichst zeitnah den am HRSC-Experiment beteiligten Wissenschaftlern des HRSC-CoI-Teams Bild- und 3D-Daten in mars-referenzierter Form bereitstellen zu können, wurde am DLR, Institut für Planetenforschung, in Zusammenarbeit mit dem Institut für Geologische Wissenschaften der Freien Universität Berlin eine operationelle Verarbeitungskette aufgebaut, die die komplette Verarbeitung von den Rohdaten bis hin zu animierten 3D-Repräsentationen umfasst.

Der erste Teil umfasst die standardisierte Erstellung von Digitalen Oberflächenmodellen (DOM) und multispektralen Orthobilddaten, die auf den mehrjährigen Erfahrungen am DLR in der Verarbeitung von HRSC-Flugzeugdaten zurückgreift (SCHOLTEN et al., 2002). Dabei werden die zuvor beschriebenen Eingangsdaten sehr effizient und hochgradig automatisiert auf einem Linux-PC-Cluster mit Script-gesteuerten Prozessen verarbeitet. Durchgeführt wird eine flächenbasierte Mehrbild-Korrelation in Epipolar-Bilddaten der Stereokanäle; diese Daten dienen, z.B. in Form von Anaglyphen, als erste 3D-interpretierbare Produkte (Abb. 4).

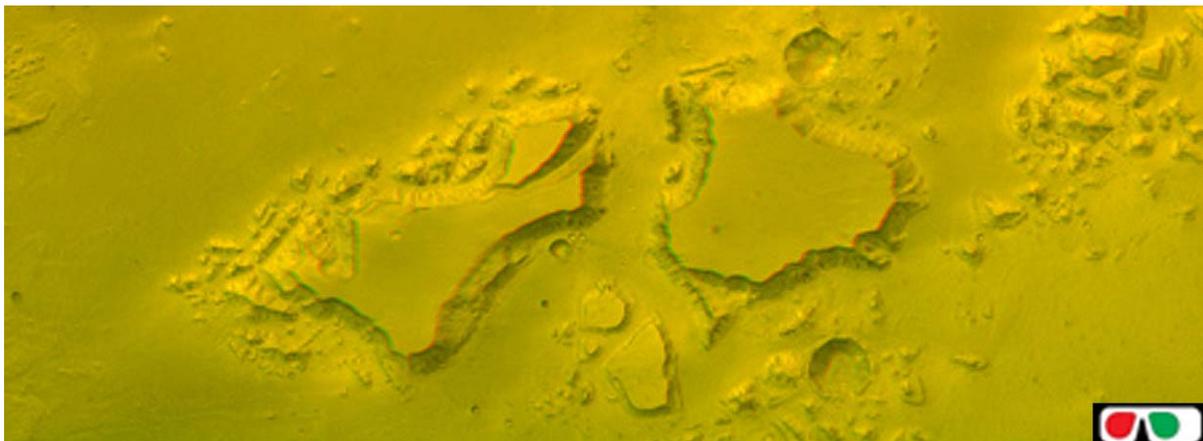


Abb. 4: Anaglyphe aus 2 Stereokanälen in Epipolar-Geometrie

Mit Hilfe der Matching-Ergebnisse und der Orientierungsdaten erfolgt eine 3D-Modellierung mit anschließender Interpolation von Digitalen Oberflächenmodellen (Abb. 5). Aufbauend auf dem DOM werden die Bilddaten der einzelnen Orbits zu Orthobildstreifen entzerrt (Abb. 6). Im Rahmen der Mission werden sich überlappende Orbits abschließend zu Orthobildmosaiken und in einem globalen DOM zusammengeführt. Die erzielten Auflösungen der Bildprodukte entsprechen der Originalauflösung von bis zu 10m/Pixel. Digitale Oberflächenmodelle werden in Rasterweiten von 50-200m erzeugt.

Während der Schwerpunkt der photogrammetrischen Datenverarbeitung auf den Mehrzeilen-Daten der HRSC liegt, liefert das Zusatzmodul der HRSC, die SRC (Super Resolution Channel, Framekamera mit 1000 mm Brennweite) Detailinformation in einer nominell bis zu 5-fach höheren Auflösung (bis zu 2m/Pixel), die in die HRSC-Daten integriert werden. Der in den SRC-Daten sichtbare Faktor der Auflösungsverbesserung beträgt aufgrund von noch nicht korrigierten thermalen Einflüssen bislang etwa 2-3 (Abb. 7).

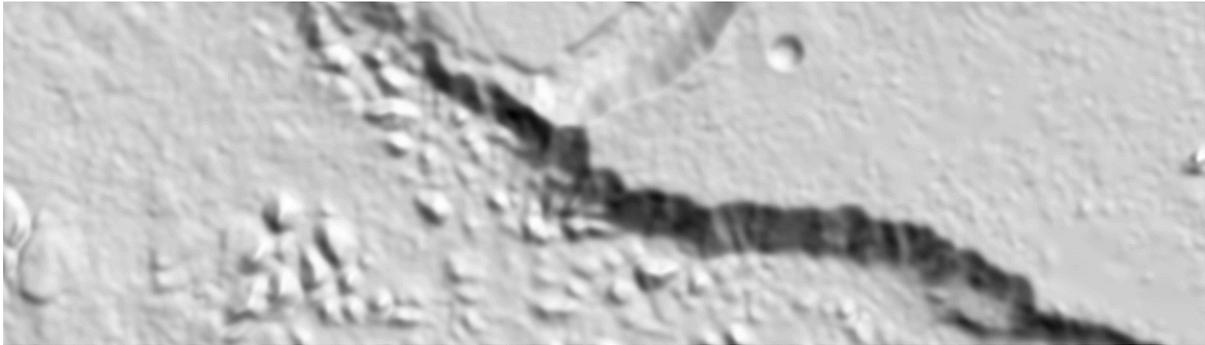


Abb. 5: Schummerungsdarstellung (Shaded Relief) eines HRSC-DOM (orig.: 50m Raster)

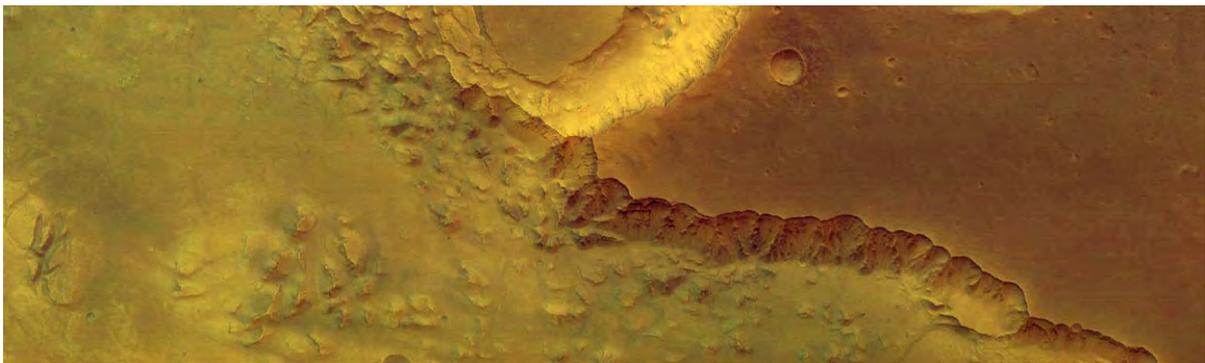


Abb. 6: HRSC-Farborthobild (orig.: 12,5 m/Pixel)

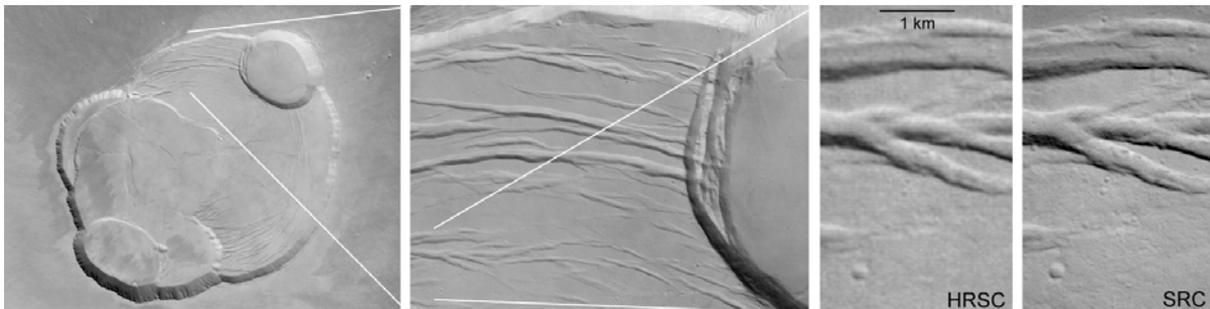


Abb. 7: Vergleich: HRSC und SRC

Die auf den originalen Bahn- und Lagedaten basierende operationelle Verarbeitung der HRSC-Daten liefert bereits relative 3D-Genauigkeiten innerhalb eines Orbits von bis zu 30m, sowie Absolutabweichungen zu MOLA-Daten von bis zu 50m in der Höhe (OBERST et al., 2004). Absolute laterale Abweichungen von bis zu einigen hundert Metern sind in der Regel auf zum Zeitpunkt der Prozessierung noch unkorrigierte Zeitdriften auf dem Mars Express Orbiter zurückzuführen.

Aufbauend auf den operationellen Orthobild- und DOM-Daten, die i.d.R. bereits 1-2 Tage nach der Datenaufnahme vorliegen, werden am Institut für Geologische Wissenschaften der Freien Universität Berlin in Zusammenarbeit mit dem DLR verschiedenen dreidimensionale Visualisierungen für wissenschaftliche Zwecke und für öffentliche Darstellungen abgeleitet. Diese umfassen neben den stereoskopischen Darstellungen in Anaglyphenform auch farbtexurierte 3D-Perspektivansichten (Abb. 8) bis hin zu simulierten Überflügen in Form von 3D-Videosequenzen.

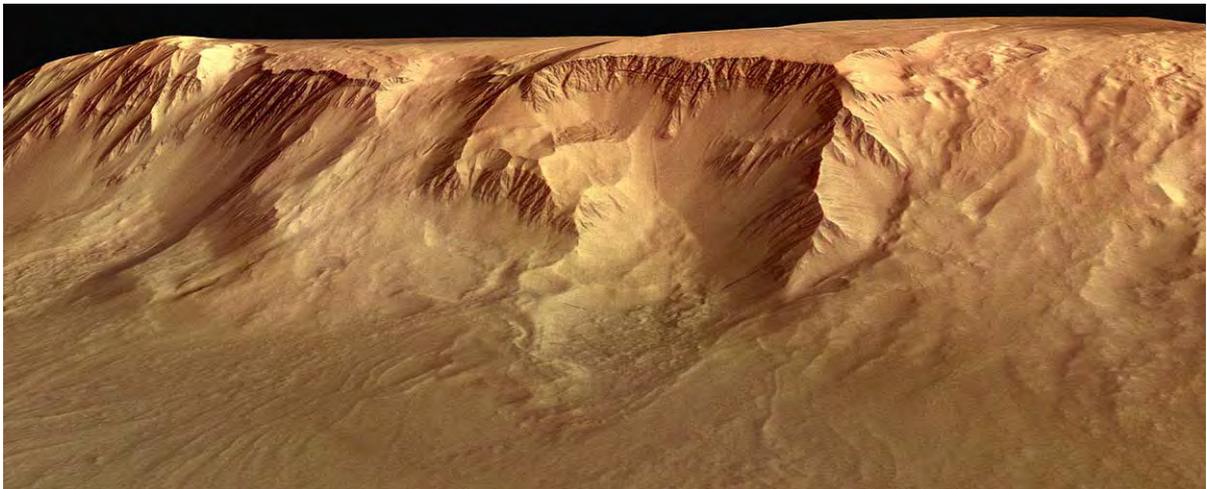
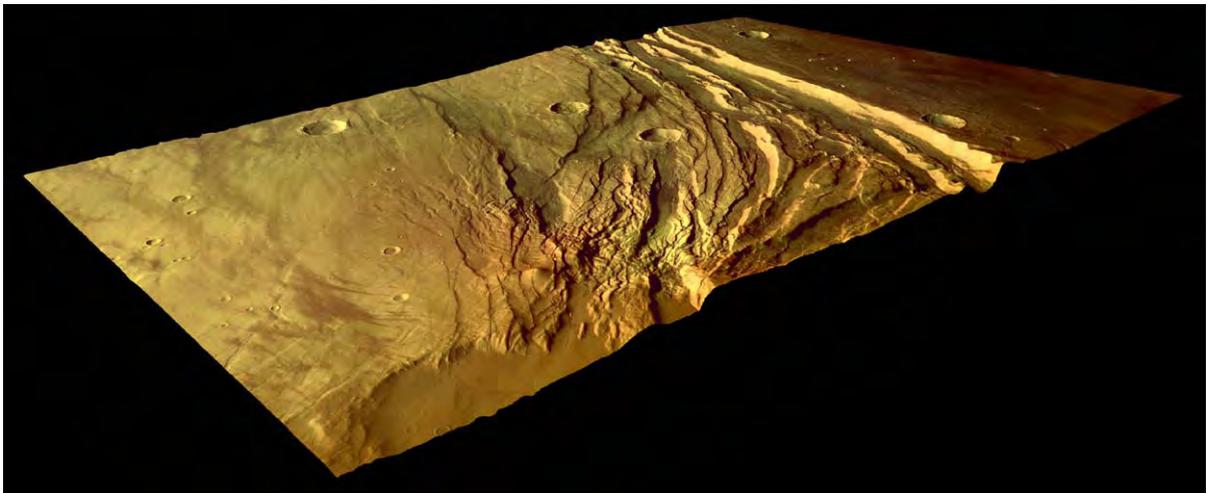
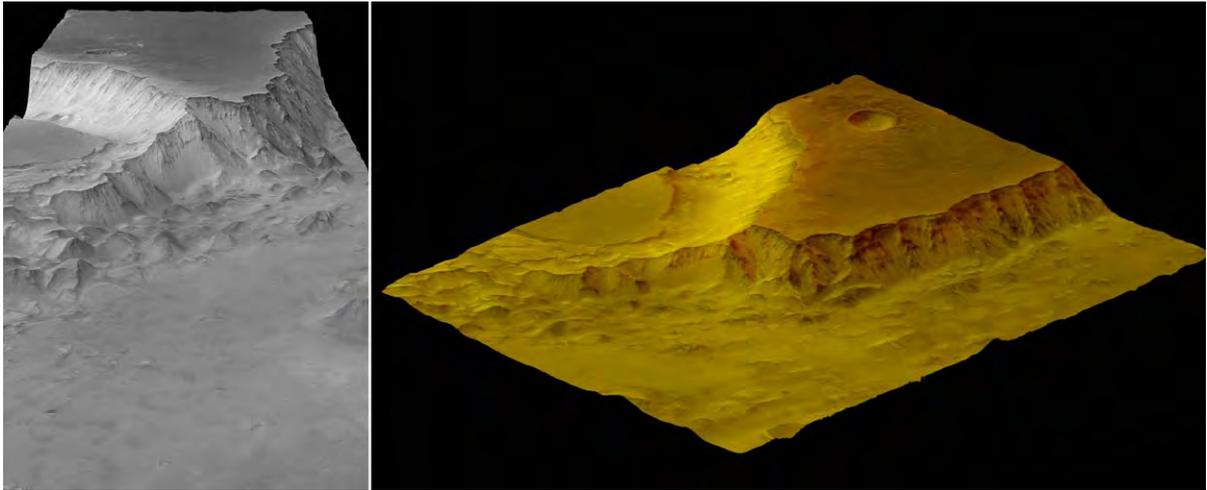


Abb. 8a,b,c: Perspektivansichten, generiert aus HRSC-Orthobilddaten und HRSC-DOM

Die gesamte operationelle Verarbeitungskette hat ihre Leistungsfähigkeit bereits in der Commissioning Phase, in der von über 400 Orbits mehr als 100 für HRSC-Beobachtungen genutzt wurden, unter Beweis gestellt. Aktuelle Entwicklungen befassen sich mit einer weiteren Optimierung der Verarbeitungsparameter, die aufgrund der Einflüsse durch z.T. hohe

Staubanteile in der Mars-Atmosphäre und durch die Datenkompression adaptiv an die jeweiligen Eigenschaften der HRSC-Daten angepasst werden müssen.

2.2 Weiterführende photogrammetrische Arbeiten

Neben den mit der operationellen Verarbeitung der HRSC-Daten verbundenen Arbeiten am DLR und an der Freien Universität Berlin vervollständigen noch weitere Beiträge von Co-Investigatoren die photogrammetrischen Aktivitäten im HRSC-Team. Die hierzu durchgeführten Arbeiten haben bereits zu erfolgversprechenden Ergebnissen, z.B. einer weiteren Verbesserung der erzielbaren Genauigkeiten, geführt.

Dies sind zum einen die Universität Hannover (Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, CoI: Prof. HEIPKE) mit Arbeiten zur Punktbestimmung (HEIPKE et al., 2004) für eine Optimierung der Bahn- und Lagedaten mit Hilfe von Methoden des Bündelblockausgleichs von Mehr-Zeilen-Daten, die an der Technischen Universität München (Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, CoI: Prof. EBNER) erarbeitet und eingesetzt werden (EBNER et al., 2004). Zum anderen befasst sich die Universität der Bundeswehr in München (Institut für Photogrammetrie und Kartographie, CoIs: Prof. DORRER und Prof. MAYER) mit photoklinometrischen Verfahren zur DOM-Verbesserung (Shape-from-Shading), (DORRER et al., 2004), sowie die Technische Universität Wien (Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, CoI: Prof. KRAUS) mit Interpolationsverfahren bei der DOM-Generierung. Abschließend seien noch die Beiträge der Technischen Universität Berlin (Arbeitsgruppe Geoinformationstechnik und Kartographie, CoI: Prof. ALBERTZ) zur Erstellung von Topographischen Bildkarten (ALBERTZ et al., 2004) und der Technischen Universität Dresden (Institut für Kartographie, CoI: Prof. BUCHROITHNER) zur Erstellung von 3D-Karten genannt.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Bereits in der ersten Phase der Mars Express Mission konnten mit photogrammetrischen Methoden beeindruckende erste Ergebnisse aus den HRSC-Daten mit ihrer einzigartigen Kombination aus hoher Auflösung, multispektralen Fähigkeiten und der gleichzeitigen Mehrfach-Stereoabdeckung abgeleitet werden. Im weiteren Verlauf der Mission ist mit Hilfe der laufenden Arbeiten einer weitere Optimierung der Produktqualität sowie eine stetig wachsende Abdeckung der Marsoberfläche zu erwarten. Nahaufnahmen bei Vorbeiflügen an den Marsmonden Phobos und Deimos sowie weitere Detailaufnahmen mit der SRC werden zum wissenschaftlichen Nutzen des HRSC-Kamera-Experiments ebenfalls beitragen.

Dank

Die Arbeiten des HRSC-Principal Investigators, Prof. Dr. GERHARD NEUKUM, an der Freien Universität Berlin werden mit Mitteln des DLR unterstützt. Die Autoren würdigen darüber hinaus ausdrücklich die Beiträge des gesamten HRSC-Co-Investigatorenteams sowie deren Mitarbeiter, deren großes persönliches Engagement zum bisherigen Gelingen des HRSC-Experiments auf Mars Express beigetragen hat.

Literaturverzeichnis

- ALBERTZ, J., GEHRKE, S., WÄHLISCH, M., LEHMANN, H., SCHUMACHER, T., NEUKUM, G. and the HRSC Co-Investigator Team, Digital cartography with HRSC on Mars Express, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS).
- DORRER, E., MAYER, H., OSTROVSKIY, A., REZNIK, S., NEUKUM, G. and the HRSC Co-Investigator Team, 2004: De- and Re-Shading of Mars Express HRSC Image data for homogenization of map relief shading, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS).
- EBNER, H., SPIEGEL, M., BAUMGARTNER, A., GIESE, B., NEUKUM, G. and the HRSC Co-Investigator Team, 2004: Improving the exterior orientation of Mars Express HRSC imagery, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS).
- HEIPKE, C., SCHMIDT, R., BRAND, R., OBERST, J., NEUKUM, G. and the HRSC Co-Investigator Team, 2004: Performance of automatic tie point extraction using HRSC imagery of the Mars Express Mission, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS).
- NEUKUM, G., OBERST, J., SCHWARZ, G., FLOHRER, J., SEBASTIAN, I., JAUMANN, R., HOFFMANN, H., CARSENTY, U., EICHENTOPF, K., PISCHEL, R., 1995: The Multiple Line Scanner Camera Experiment for the Russian Mars96 Mission: Status Report and Prospect for the Future. In Photogrammetric Week '95, eds. D. Fritsch & D. Hobbie, Wichmann, Heidelberg, S. 45-61.
- NEUKUM, G., JAUMANN, R. and the HRSC Co-Investigator and Experiment Team, 2004: HRSC: the High Resolution Stereo Camera of Mars Express; ESA Special Publications SP-1240.
- OBERST, J., ROATSCH, T., GIESE, B., WÄHLISCH, M., SCHOLTEN, F., GWINNER, K., MATZ, K.-D., HAUBER, E., JAUMANN, R., ALBERTZ, J., GEHRKE, S., HEIPKE, C., SCHMIDT, R., EBNER, H., SPIEGEL, M., VAN GASSELT, S., NEUKUM, G. and the HRSC Co-Investigator Team, 2004: The mapping performance of the HRSC / SRC in Mars orbit, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS).
- SCHOLTEN, F., GWINNER, K., WEWEL, F., 2002: Angewandte Digitale Photogrammetrie mit der HRSC. - Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation, 5, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, S. 317-332.

Generierung und Validierung von Höhenmodellen aus Weltrauminformationen

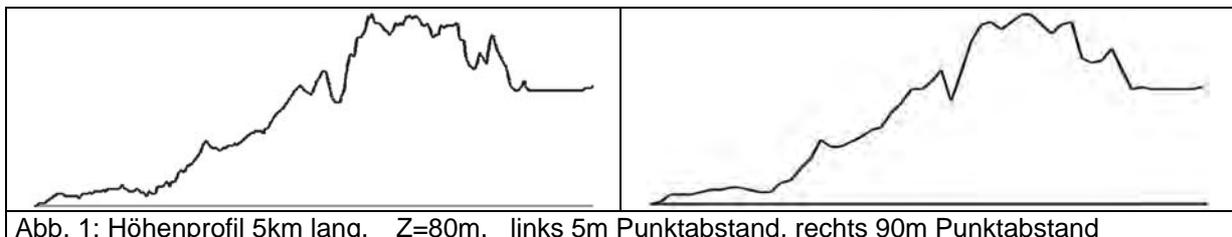
KARSTEN JACOBSEN¹

Zusammenfassung: Digitale Höhenmodelle (DHM) die aus Weltraumbildern erstellt werden sollen, müssen mit den frei verfügbare SRTM C-Band-Höhenmodellen verglichen werden, um keinen vermeidbaren Aufwand zu betreiben. Die SRTM-Daten weisen in steilen Gebieten nicht unerhebliche Lücken auf. Ihre Genauigkeit von 3m bis 5m im Flachland und bis zu 20m in steileren Gebieten ist mit der Rasterweite von 3", entsprechend etwa 90m, auch nicht immer ausreichend. Die Morphologie ist nicht sehr detailliert. Somit besteht immer noch der Bedarf an hoch aufgelösten DHM's mit zufrieden stellender Genauigkeit. Die DHM's weisen keine einheitliche Genauigkeit auf, in Forstgebieten ist mit systematischen Fehlern zu rechnen und die Genauigkeit ist von der Geländeneigung abhängig. Aus präzisen DHM's sind die Punkte, die nicht zur Geländeoberfläche gehören, herauszufiltern. Die SRTM Höhenmodelle müssen auf ihre genaue Lage überprüft werden.

1 Einführung

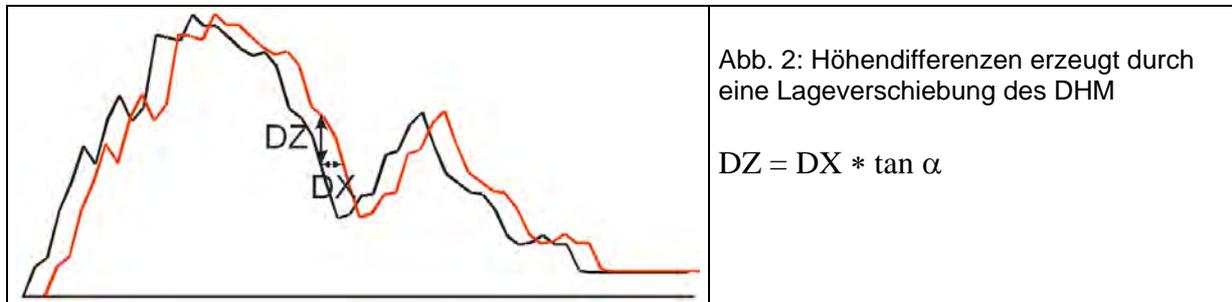
Digitale Höhenmodelle (DHM's) sind ein wichtiger Bestandteil von Geoinformationssystemen. Mit dem frei verfügbare SRTM C-Band DHM's ist zur Zeit für Europa, Asien, Afrika und Amerika für den Breitenbereich von -56° bis $60,25^{\circ}$ ein für viele Zwecke ausreichender Datensatz verfügbar (<http://edcsgs9.cr.usgs.gov/pub/data/srtm/>). Wenn trotzdem aus Weltraumdaten Höhenmodelle mit nicht unerheblichem Aufwand erstellt werden sollen, so müssen diese Vorteile gegenüber den SRTM-Daten aufweisen. Durch die Fülle verschiedener Weltrauminformationen, die naher Zukunft noch zunehmen werden, bestehen verschiedenste Optionen, die optimal kombiniert werden können um durch die SRTM-Daten nicht beseitigten Probleme lösen zu können.

Sowohl die SRTM- als auch die aus optischen Daten automatisch berechneten DHM's beschreiben die Höhe der Vegetation und der Gebäude. Das C-Band RADAR (5,6cm Wellenlänge) dringt nur unwesentlich in die Vegetationsoberfläche ein. Das so erhaltene Digitale Oberflächenmodell (DOM) muss somit gefiltert werden, um die nicht zum Boden gehörenden Punkte zu entfernen. Diese Filterung ist nur dann erfolgreich, wenn das Rauschen der erstellten Höhenmodelle deutlich unter der Höhe der Bäume und Gebäude liegt und auch eine ausreichende Anzahl von Geländepunkten vorhanden ist.



¹ Dr. Karsten Jacobsen, Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, Nienburger Str. 1, D-30167 Hannover, jacobsen@ipi.uni-hannover.de

Nicht nur die Genauigkeit des DHM, auch der Punktabstand ist von Bedeutung wie aus Abbildung 1 ersichtlich. Die Interpolation des gezeigten DHM mit 90m Punktabstand führt zu einem Genauigkeitsverlust von 2,4m. In dem später näher erläuterten gebirgigen Testgebiet Zonguldak führt die Interpolation eines DHM mit 90m Punktabstand sogar zu einem Genauigkeitsverlust von 12m. Neben dem Verlust von morphologischen Details ist somit der Genauigkeitsverlust in stärker bewegtem Gelände nicht unerheblich.



Genauigkeitsprobleme von DHM's können auch durch Lageverschiebungen hervorgerufen werden (Abb. 2). Lagefehler der SRTM-Daten können durch die direkte Sensororientierung (GPS + Kreisel + Sternkamera) hervorgerufen werden. Häufig gibt es aber auch Probleme mit dem Datum der benutzten Landeskoordinatensysteme in Relation zum Internationalen Bezugssystem (ITRF). In vielen Ländern ist das Datum nicht publiziert, manchmal auch nicht richtig bekannt. Eine Überprüfung der Lage der DHM's ist somit immer empfehlenswert.

2 Shuttle Radar Topography Mission

Mit Interferometrischem Synthetischen RADAR (InSAR) wurde im Rahmen der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) im Februar 2000 die Landfläche von -56° bis $60,25^\circ$ Breite aufgenommen. Die SRTM-Mission umfasste sowohl das deutsch-italienische X-Band (3cm Wellenlänge) als auch das US-amerikanische C-Band. Das X-Band SAR wies nur eine Streifenbreite von 45km auf, womit die Landfläche nicht vollständig erfasst wurde. Das C-Band hatte dagegen mit dem Scan-SAR-Mode eine Streifenbreite von 225km, womit sogar 94,6% der Landmasse mindestens zweimal abgedeckt wurde. Die theoretisch höhere Genauigkeit der kürzeren Wellenlänge des X-Bandes wurde damit zumindest teilweise durch eine Mehrfachüberdeckung kompensiert.

Radaraufnahmen haben durch das layover und Schatten Probleme in steilen Gebieten. Die X-Band-Daten werden vom DLR zusammen mit einer Höhenfehlerkarte ausgeliefert, welche die abgeschätzten Höhengenaugkeiten enthalten. Die problematischen Flächen werden damit gut beschrieben. Die C-Band-Daten enthalten dort Datenlücken. In dem extremen $1^\circ * 1^\circ$ -DHM im Bereich des Mount Everest fehlen 9% der Höhen, weltweit allerdings nur 0,15%. Das DLR vertreibt die X-Band Höhenmodelle mit einer Rasterweite von $1''$, entsprechend etwa 30m, während die C-Band-Daten mit Ausnahme der USA nur mit einer Rasterweite von $3''$, entsprechend etwa 90m, verfügbar sind. Abbildung 3 zeigt den Informationsverlust des C-Band DHM mit einer Rasterweite von $3''$ gegenüber der Rasterweite von $1''$. Dementsprechend führt auch die Interpolation der DHM's mit größerer Rasterweite auf kleinere Abstände zu Genauigkeitsverlusten (Tabelle 1). Die Interpolationsverluste sind von der Änderung der Geländeneigung abhängig und können bei bewegtem Gelände erhebliche Beträge annehmen.

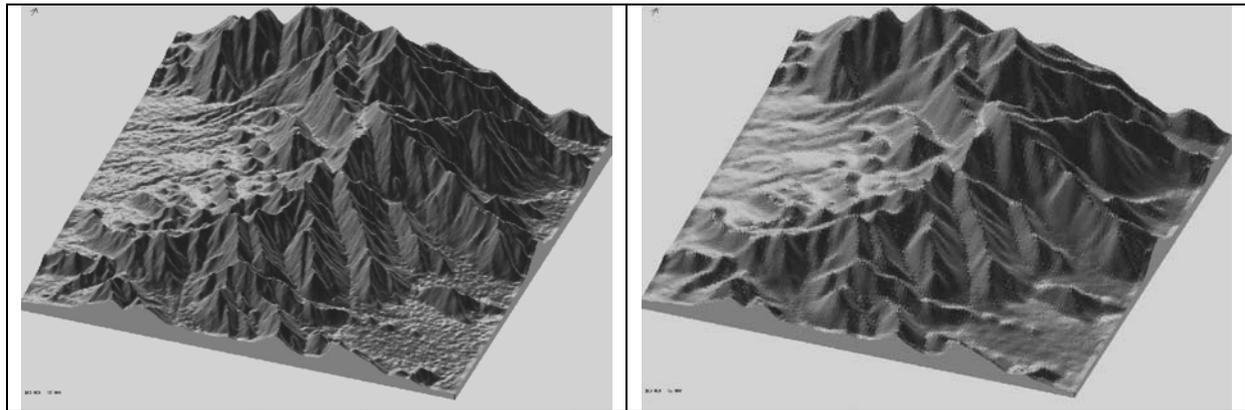


Abb. 3: SRTM C-Band DHM 10km x 10km

links: DHM mit 1" Rasterweite

rechts: DHM mit 3" Rasterweite

	Rasterweite	durchschnittliche Geländeneigung	durchschnittliche Änderung der Geländeneigung	SZ
Zonguldak	80m	0.27	0.32	12.0 m
Arizona	90m	0.17	0.09	4.8 m
New Jersey	60m	0.024	0.015	0.45 m
New Jersey	120m	0.024	0.015	1.12 m

Im Bereich von Zonguldak, Türkei wurden sowohl das C-Band- als auch das X-Band-Höhenmodell untersucht. Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, handelt es sich in Zonguldak um ein sehr bewegtes Gelände mit Höhen von 0m (Schwarzes Meer) bis 847m. Die durchschnittliche Geländeneigung von 27% wird noch von der durchschnittlichen Änderung der Geländeneigung von einer Rasterweite zur nächsten mit 32% übertroffen. Als Referenz ist ein DHM, abgeleitet aus einer topographischen Karte 1 : 25 000, verfügbar. Ein erster Vergleich der Höhenmodelle zeigte eine klare Lageverschiebung der SRTM-Daten gegenüber dem Referenzmodell. Die SRTM-Daten basieren auf der direkten Sensororientierung ohne lokale Passpunkte, so dass ein systematischer Lagefehler erwartet werden muss. Darüber hinaus war das Datum der türkischen Landeskoordinaten gegenüber dem internationalen terrestrischen Referenzsystem, das für die SRTM-Daten benutzt wird, nicht bekannt. Aus diesem Grund wurden in einem ersten Schritt die SRTM-Höhenmodelle auf das Referenzhöhenmodell durch Ausgleichung mit dem Programm DEMSHIFT verschoben, wodurch sich das Quadratmittel der Widersprüche um den Faktor 2 verbesserte. Eine entsprechende Verschiebung war auch bei den anderen untersuchten Datensätzen erforderlich.

	DZ > 50m	SZ [m]	Bias [m]	SZ F(Neigung) [m]	DZ > 50m	SZ [m]	Bias [m]	SZ F(Neigung) [m]
	X-Band DHM				C-Band DHM			
Offen	0.67%	10.7	-3.5	$7.6 + 9.5 * \tan \alpha$	2.11%	9.9	-2.9	$7.8 + 6.4 * \tan \alpha$
Forst	0.39%	13.8	-8.1	$11.4 + 10.5 * \tan \alpha$	0.03%	13.6	-8.3	$11.6 + 10.5 * \tan \alpha$
Vergleichspunkte	0	5.4	-2.0	$1.3 + 40.6 * \tan \alpha$	0	9.4	-2.0	$4.0 + 122 * \tan \alpha$

45% des Testgebietes Zonguldak ist mit Waldflächen bedeckt. Da sowohl das C-Band- als auch das X-Band-Radar nicht wesentlich in die Waldoberfläche eindringen, wird durch das

InSAR, als auch bei automatischer Bildzuordnung optischer Bilder, die sichtbare Oberfläche erfasst. In Forstflächen ist damit mit systematischen Fehlern zu rechnen, die auch klar in Tabelle 2 in Erscheinung treten. Die systematischen Höhenfehler von 8,1m und 8,3m in den Waldflächen sind nicht weit von der durchschnittlichen Baumhöhe von etwa 10m entfernt. Eine Datenanalyse mit dem Hannoverschen Programm DEMANAL zeigte eine klare Abhängigkeit der Höhengenaugkeit von der Geländeneigung in der Form $SZ = a + b * \tan \alpha$ mit α als Geländeneigung. In offenen Gebieten ergibt sich damit für das C-Band DHM eine Standardabweichung der Höhe für flaches Gelände von 7.8m und für um 45° geneigtes Gelände von 14,2m. Die an Vergleichspunkten vorhandenen Widersprüche sind wesentlich kleiner als die Widersprüche gegenüber dem Referenzhöhenmodell. Vergleichspunkte haben allerdings hervorgehobene Eigenschaften, sie liegen in der Regel in ebenen und klar definierten Flächen. Die Analyse zeigt, dass die Höhengenaugkeit eines DHM nicht mit einer einzigen Zahl beschrieben werden kann – eine Unterscheidung nach der Vegetation und der Geländeneigung ist unbedingt erforderlich. Die Standardabweichungen ohne Berücksichtigung der Geländeneigung (SZ) sind nicht ausreichend. Ohne die horizontale Verschiebung des DHM erreicht SZ für die C-Band-Daten in offenem Gelände 26,1m statt 9,9m nach der Verschiebung.

Ein nicht unerheblicher Anteil der Höhen hat größere Differenzen als 50m. Bei den C-Band Daten wird diese Toleranzgrenze von 2,11% der Punkte in offenem Gelände überschritten, allerdings nur bei 0,67% der X-Band Daten. Der größere Anteil in offenem Gelände ist auf die steilen, teilweise fast senkrechten Anstiege an der Küste zurückzuführen. Die Radaraufnahmen haben hier Probleme. Wegen der größeren Streifenbreite der C-Band Aufnahmen fängt das layover bereits bei 30° Geländeneigung an, während es bei den X-Band Daten erst bei etwa 50° anfängt, wodurch der höhere Anteil grober Fehler der C-Band Daten erklärt werden kann.

	SZ [m]	Bias [m]	SZ F(Geländeneigung)
Arizona	3.9	1.3	$2.9 + 22.5 * \tan \alpha$
Williamsburg NJ	4.7	-3.2	$4.7 + 2.4 * \tan \alpha$
Atlantic City	4.7	-3.6	$4.9 + 7.6 * \tan \alpha$
Bayern, hügelig, offenes Gebiet	4.6	-1.1	$2.7 + 8.8 * \tan \alpha$
Bayern, Gebirge, offenes Gebiet	8.0	-2.4	$4.4 + 33.4 * \tan \alpha$

Tabelle 4: Genauigkeit der C-Band-DHM's in unterschiedlichen Testgebieten

In Deutschland und den USA standen genauere Referenzdaten zur Verfügung, dementsprechend wurden auch bessere Genauigkeiten für die C-Band-DHM's erzielt (siehe Tabelle 4). Im Prinzip tauchten die gleichen Probleme auf – die SRTM-Höhenmodelle mussten in X und Y auf die Referenzhöhenmodelle verschoben werden und es ergaben sich unterschiedliche Genauigkeiten für offene und Wald-Gebiete. In Tabelle 4 sind nur die Ergebnisse für die offenen Gebiete enthalten. Die Quadratmittel der Widersprüche (SZ) sind für das gebirgige Gelände am größten; wird jedoch der von der Geländeneigung abhängige Anteil abgespaltet, so unterscheiden sich die Standardabweichungen der Höhen nur noch von 2,7m bis 4,9m. Wird außerdem der systematische Fehleranteil berücksichtigt, verbessert sich die Genauigkeit für offenes und ebenes Gelände auf 2,5m bis 3,7m. Typisch für das gebirgige Testgebiet in Bayern ist, dass 3% der Höheninformationen im Datensatz fehlen.

	nominelle Objektpixelgröße	effektive Objektpixelgröße	Tabelle 5: effektive Objektpixelgröße von Weltraumbildern bestimmt durch Kantenanalyse
ASTER	15 m	16.5 m	
TK 350	(10 m)	13 m	
IRS-1C	5.8 m	6.9 m	
SPOT 5	5 m	5 m	
IKONOS pan	1 m	1.0 m	

In dem Testgebiet Zonguldak, Türkei, wurden verschiedene Weltraumbilder mittels Kantenanalyse untersucht. Es zeigte sich, dass bei ASTER, TK350 und IRS-1C die effektive Pixelgröße größer als die nominelle war. Bei TK350 handelt es sich um ein Weltraumfoto bei dem die Pixelgröße nicht von Anfang an fest steht, sondern sich durch das Scannen ergibt. Eine andere effektive Pixelgröße ist somit zu erwarten. Unterschiedliche Weltraumbilder wurden für die Erstellung von Höhenmodellen durch automatische Bildzuordnung verwendet. Sie erfolgte mit dem Hannoverschen Programm DPCOR nach der Methode der kleinsten Quadrate.

Sensor	Pixel- größe [m]	Höhe / Basis	Gebiet / Punktart	SZ [m]	SZ F(Geländeneigung) [m]
TK 350	(10 /13)	2,0	offen	23.3	$20.0+23.9*\tan\alpha$
			Forst	51.3	$49.0+11.4*\tan\alpha$
			Vergleichspunkte	6.6	$4.7 + 2.2*\tan \alpha$
ASTER	15	1,7	offen	25.0	$21.7+14.5*\tan\alpha$
			Forst	31.2	$27.9+18.5*\tan\alpha$
			Vergleichspunkte	12.7	
SPOT 5	5	1,85	offen	11.9	$8.4 + 6.3*\tan \alpha$
			Forst	15.0	$9.8 + 5.3*\tan \alpha$
			Vergleichspunkte	3.8	$3.5 + 0.9*\tan \alpha$
SPOT 5 HRS	5 * 10	1,2	offen	6.7	$6.4 + 4.9*\tan \alpha$
			Forst	17.0	$16.4+ 2.2*\tan \alpha$
SPOT 5 HRS gefiltert	5 * 10	1,2	offen	4,4	$4,2 + 1.6*\tan \alpha$
			Forst	12.3	$10.0 + 6.9*\tan\alpha$
IKONOS	1	7,5	Maras	1.7	gleicher Orbit
IKONOS	1	3,8	Zonguldak	5.8	$\Delta t = 3 \text{ Monate}$
QuickBird	0,62	9,1	Arizona	4.8	$\Delta t = 10 \text{ Tage}$

Tabelle 6: Genauigkeit von Höhenmodellen erstellt aus Weltraumbildern

Die benutzten russischen Weltraumfotos von der TK350 hatten keine gute Bildqualität. Sie waren stark verkratzt und wiesen ein starkes Filmkorn auf. Der Kontrast in den Waldgebieten war so schwach, dass die Ergebnisse in den Waldflächen nicht akzeptabel waren. Die Standardabweichung der Höhen in flachen und offenen Gebieten von 20m entspricht einer Parallaxengenauigkeit von 0,8 Pixeln im Verhältnis zur effektiven Pixelgröße von 13m. Dagegen wurde zwischen durch GPS bestimmten Vergleichspunkten und dem TK350-DHM im Quadratmittel eine Abweichung von nur 4,7m in flachen Bereichen erzielt, entsprechend einer Parallaxengenauigkeit von 0,2 Pixeln. Vergleichspunkte eignen sich nicht zur realistischen Abschätzung der Genauigkeit eines DHM da sie in Bereichen mit gutem Bildkontrast liegen und in der Regel nicht durch unmittelbar benachbarte Objekte gestört werden.

Die ASTER-Bilder haben eine stereoskopische Überdeckung der Kanäle im nahen Infrarot. Dieses hat einen großen Vorteil für die Bildzuordnung in Waldflächen, die in diesem Spektralbereich gute Kontraste aufweisen. Die Genauigkeit von 21,7m in flachen und offenen Gebieten entspricht einer Parallaxengenauigkeit (Spx) von 0,85 Pixeln. Trotz der im Verhältnis zu den SRTM-DHM's eingeschränkten Höhengengenauigkeit führt die mögliche Rasterweite des DHM von 3 Pixeln, entsprechend 45m, in gebirgigen Bereichen zu einer besseren Detailinformation als bei den SRTM-Daten mit einer Rasterweite von 90m.

Ein SPOT 5-Stereomodell, das nur einen Tag Zeitunterschied zwischen den beiden Bildern aufweist, war als Level 1A und Level 1B Produkt verfügbar. Die unterschiedliche Geometrie dieser Produkte machte eine unterschiedliche Bearbeitung erforderlich. Die Level 1A-Bilder wurden mit dem Hannoverschen Programm BLASPO für Satellitenzeilenscanneraufnahmen ausgewertet und die Level 1B-Daten mit dem Hannoverschen Programm CORIKON, das auf eine Ebene projizierte Bilder bearbeiten kann. Die erzielten Objektgenauigkeiten waren nahezu identisch, so dass in Tabelle 6 keine Unterscheidung zwischen beiden erforderlich war. Wie bei allen panchromatischen Bildern ist der Kontrast in Waldbereichen eingeschränkt, dieses wirkt sich aber nicht so negativ aus wie bei den TK350-Aufnahmen. Auch hier ist die an Vergleichspunkten erzielte Genauigkeit (Spx=0,4 Pixel) erheblich besser als die Genauigkeit des gesamten DHM (Spx=0,9 Pixel).

SPOT 5 hat neben den beiden HRG Hauptinstrumenten den zusätzlichen Stereosensor High Resolution Stereo (HRS). Dieser Sensor hat zwei Optiken die 20° nach vorne und 20° nach hinten schauen und damit eine Stereoüberdeckung vom selben Orbit ermöglichen. Die HRS-Bilder werden normalerweise nicht vertrieben, sie standen aber im Rahmen einer Arbeitsgruppe für das SPOT HRS study team zur Verfügung. In dem Testgebiet Chiemsee konnten als Referenzdaten Laserscanning-DHM's der Bayerischen Landesvermessung benutzt werden. Die mit den HRS-Aufnahmen erzielten Genauigkeiten liegen unter den Einflüssen von Bäumen und Gebäuden auf die Höhenbestimmung. Damit konnten die HRS-Höhenmodelle mit dem Hannoverschen Programm RASCOR gefiltert werden, das die nicht zur Erdoberfläche gehörenden Punkte aus dem Datensatz entfernt. Liegen allerdings in geschlossenen Waldgebieten keine Punkte auf dem Boden, so ist auch die Wirkung der Filterung eingeschränkt. In Tabelle 6 ist die deutliche Genauigkeitssteigerung durch die Filterung zu sehen.

Die hohe Auflösung der IKONOS- und QuickBird-Aufnahmen verspricht von vornherein eine höhere Auswertegenauigkeit. In Maras war ein Stereopaar, aufgenommen vom gleichen Orbit, verfügbar. Das schwache Höhen-Basis-Verhältnis von 7,5 führt zwar zu schleifenden Schnitten, hat aber große Vorteile für die automatische Bildzuordnung, so dass eine Parallaxengenauigkeit von 0,22 Pixeln erreicht wurde. Die Details des abgeleiteten DHM enthalten ausreichende Details zur Erstellung eines 3D-Stadtmodell. Dagegen lagen im Bereich Zonguldak IKONOS-Bilder vor, die im Juli und im Oktober aufgenommen wurden. Während dieser Zeit änderte sich die Sonnenhöhe von 67° auf 41° und bewirkte stark geänderte Schatten. Dadurch war die automatische Bildzuordnung in den Waldgebieten weitgehend erfolglos, aber auch im Stadtgebiet gab es erhebliche Probleme – sichtbar auch in der Genauigkeit des Höhenmodells von nur +/-5,8m, entsprechend einer Parallaxengenauigkeit von nur 1,5 Pixeln.

Im Bereich von Arizona lagen zwei QuickBird-Aufnahmen mit einem Aufnahmezeitunterschied von 10 Tagen vor. Während dieser Zeit änderte sich die radiometrische Grundlage nicht, so dass es keinerlei Schwierigkeiten mit der automatischen Bildzuordnung gab. Die

erzielte Genauigkeit von $\pm 4,8\text{m}$ im Verhältnis zu dem nicht fehlerfreien Höhenmodell des USGS entspricht einer Parallaxengenauigkeit von 0,8 Pixeln.

4 Zusammenfassung

Digitale Höhenmodelle können auf wirtschaftliche Weise mittels Weltrauminformationen erstellt werden. Für den größten Teil der Erde liegen die durch InSAR erstellten Höhenmodelle der Shuttle Radar Topography Mission vor. Die C-Band-Daten stehen kostenlos mit einer Rasterweite von 3“ zur Verfügung. Aus diesem Grund ist es nicht sinnvoll, mit nicht unerheblichem Aufwand Höhenmodelle aus Weltraumaufnahmen zu erstellen, die keinen Vorteil gegenüber den SRTM-Daten haben. Für ebene und offene Gebiete haben sie eine Genauigkeit in der Größenordnung von $\pm 2,7\text{m}$ bis $\pm 4,9\text{m}$ wenn die meistens vorhandenen Lageverschiebungen berücksichtigt werden.

Die aus Weltraumbildern erstellten DHM's haben in offenen und ebenen Gebieten eine Genauigkeit, die einer Standardabweichung der x-Parallaxe von etwa 0,8 Pixeln entspricht (in Formel 1: Faktor = 0,8). Mit Vergleichspunkten wird dagegen ein Sp_x von 0,2 bis 0,5 Pixeln erreicht – Vergleichspunkte sind jedoch nicht repräsentativ für die Genauigkeit der Höhenmodelle. Die sinnvolle Rasterweite von mittels automatischer Bildzuordnung erstellter DHM's liegt bei 3 Pixeln. Damit können trotz der niedrigeren Genauigkeit in Gebirgen mehr Details aus ASTER-DHM's als aus den SRTM Resultaten entnommen werden. Für die SPOT-Aufnahmen trifft dieses bereits im Flachland zu. Die sehr hoch auflösenden IKONOS- und QuickBird-Aufnahmen lassen deutlich bessere Genauigkeiten zu. Ihre Rasterweite liegt auch in einer anderen Abstandsklasse. Die geometrische Qualität eines Höhenmodells kann nicht mit einer einzigen Größe beschrieben werden, es gibt eine klare Abhängigkeit von der Geländeneigung und in Waldgebieten ist neben systematischen Fehlern auch mit einer größeren Standardabweichung zu rechnen.

Literaturverzeichnis

- AIRAULT, S., MANDÉ, ST., GIGORD, P., CUNIN, L., BRETON, E., BOUILLON, A., GACHET, R., BERNARD, M., 2003: Reference3D Accuracy and quality process: First Assessment and perspectives, ISPRS joint workshop Mapping from Space 2003, Hannover, auf CD + <http://www.ipi.uni-hannover.de/>
- BÖRNER, A., HILLIGER, E., REULKE, R., 1997: The Optimization of the Stereo Angle of CCD-Line-Sensors with end to end Simulation Systems, „Sensors and Mapping from Space“, Universität Hannover 1997, auf CD
- JACOBSEN, K., 2001: New Developments in Digital Elevation Modelling, Geoinformatics, Juni 2001, pp 18 – 21
- JACOBSEN, K., 2003: DEM Generation from Satellite Data, EARSeL Ghent 2003, Remote Sensing in Transition, Millpress ISBN 90-77017-71-2, pp 273 - 276

Validation of stereo-data of the SPOT HRS camera system

MANFRED SCHROEDER¹, PETER REINARTZ¹, MANFRED LEHNER¹, RUPERT MÜLLER¹

Zusammenfassung: ISPRS und CNES kündigten während des ISPRS Commission I Symposiums in Denver im November 2002 das HRS (High Resolution Stereo - Kamera des SPOT 5 Satelliten) Assessment Program an. 9 Testgebiete, verteilt über alle Erdteile, wurden für dieses Programm ausgewählt. Eines der Testgebiete liegt in Südbayern - hier ist der PI aus dem DLR. Das Ziel war die Ableitung von Digitalen Höhenmodellen (DEMs) aus den along-track Stereo-Daten des HRS Sensors und die Bestimmung der Genauigkeit durch Messung von Bodenpasspunkten sowie durch Vergleich mit Referenz-DEMs höherer Qualität. Für die Ableitung der DEMs wurde die DLR eigene Stereo-Prozessierungssoftware verwendet, die für die MOMS-2P Drei Zeilen Stereo-Kamera entwickelt wurde. Als erster Schritt wurden die Daten der inneren und äußeren Orientierung der Kameras extrahiert und in ein lokales tangentiales Koordinatensystem (LTS) transformiert. Die Verwendung dieser Daten, die als abgeleitete Werte aus dem DORIS- und ULS System geliefert wurden, sollte zu einer absoluten Orientierungsgenauigkeit von ca. 30 Metern führen. Eine digitale Bildkorrelation, die nahezu jedes Pixel als Kernel Zentrum verwendet (Methode des region-growing), bestimmt die lokalen Parallaxen. Die Qualität der Bildkorrelation wird kontrolliert durch vorwärts und rückwärts matching auf sub-pixel Ebene (local least squares matching). Unter Verwendung der inneren und äußeren Orientierung der Kamera wird durch Vorwärtsschnitt die Punktwolke im Objekt-raum bestimmt und mittels Interpolationsverfahren zu einem regelmäßigen Gitter aufgerastert. Das so erstellte DEM wurde mit den zur Verfügung stehenden Referenz-DEMs verglichen bzgl. Höhengenaugigkeit, Positionierungsgenauigkeit; eine Restfehleranalyse umfasste auch einen Genauigkeitsvergleich in Bezug auf bestimmte Landnutzungsklassen. Die Positionierungsgenauigkeit kann allerdings leichter durch die Erstellung von Orthobildern aus den beiden Blickrichtungen bestimmt werden. Diese liegt in den vorliegenden Testgebieten bei ca. 20 Metern, während die absolute Höhengenaugigkeit unter 10 Metern, die relative bei ca. 5 Metern liegt.

1. INTRODUCTION

The derivation of digital elevation models (DEM) from along track stereo data from space has up to now only been possible with the German MOMS-2P (MÜLLER ET AL. 2001) and the Japanese/American ASTER sensor on TERRA (TOUTIN ET AL. 2001). Both of them have lower resolution (15-18 meter pixel size) than the new HRS sensor on SPOT 5. HRS produces image stereo pairs with two optics looking forward and backward (± 20 degrees) with respect to the nadir direction. The camera has a spatial resolution of 10 meter across track and along track, but a ground sampling distance of about 5 m along track for obtaining higher resolution of the parallaxes for the DEM generation. The swath of the HRS is 120 km (12000 CCD elements) and one acquisition sequence extends 600 km along track.

¹ Prof. Dr. Manfred Schroeder, Dr. Peter Reinartz, Manfred Lehner, Rupert Müller
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. DLR, Institut für Methodik der Fernerkundung, Oberpfaffenhofen, 82234 Weßling,
e-mail: manfred.schroeder@dlr.de, peter.reinartz@dlr.de, manfred.lehner@dlr.de, rupert.mueller@dlr.de

After the ISPRS Commission I Symposium in Denver in November 2002, the HRS Scientific Assessment Program has been established. This program gives the user community the opportunity to test HRS data, which are usually not available, for generating DEM and for comparison with other DEM generation methods. For the investigations 9 test areas around the world with corresponding PIs and co-investigators have been selected. Only those areas have been selected, where the PIs could provide a sufficient data set of ground control points and a high precision DEM for comparison and accuracy checking of the derived HRS-DEM.

The data which have been provided by SPOT IMAGE contain the following parts:

- ◆ 2 sets of 8 bit panchromatic image data (size 12000 x 12000 pixel = 120 km across x 60 km along track) of the Bavarian and Catalonian test area from two viewing directions in TIF format
- ◆ XML-files containing all additional information regarding time synchronization, position (DORIS), attitude (star sensors and gyros), interior orientation
- ◆ text files containing information on the delivered data.

The data of Bavaria have been acquired on October 1st 2002 with a sun elevation of 38° and nearly no clouds. The HRS-data have been received in July 2003. First results have been presented at the ISPRS Workshop High Resolution Mapping from Space, Hannover '03 (REINARTZ ET AL. 2003).

2. TEST AREAS AND GROUND REFERENCE DATA

The test area chosen by DLR is a region of about 40 x 50 km² in the southeastern part of Bavaria. The elevations range from 400 to 2000 meters in a mostly hilly, post-glacial landscape including some lakes and also mountains of the German Alps. This selection allows the comparison of DEM for different land surface shapes, including forest and steep terrain.

The ground reference data selected for this test area are the following:

- ◆ Four regions have a grid spacing of 5 meters and an overall size of about 5 km x 5 km, derived from airborne laser scanning. The height accuracy is better than 0.5 meter.
- ◆ One region (area of Inzell, total: 10 km x 10 km, 25 meter spacing) consists partly of laser scanner data (northern part). The height accuracy is better than 0.5 meter. The southern part of the DEM is derived from contour-lines 1:10 000. The height accuracy is about 5 meter due to the mountainous area.
- ◆ A large region (50 km x 30 km) is covered by a coarser DEM with 50 meter grid spacing and height accuracy of about 2 meters, derived from aerial photogrammetry
- ◆ 81 GCP (fix points) with accuracy of 0.1 meter

3. PREPROCESSING OF ANCILLARY DATA

The delivered SPOT 5 HRS Level 1A product consists of the image data in standard TIF format and the meta data in DIMAP format. The following information is extracted for each CCD array from the XML ancillary file for further processing:

- ◆ satellite ephemeris data containing position and velocity measured by the DORIS system every 30 seconds with respect to the ITRF90 (International Terrestrial Reference Frame 1990) system during the data take and at least four times before and after image data acquisition,

- ◆ corrected attitude data with respect to the local orbital coordinate frame measured by gyros and the star tracker unit ULS with 8Hz, the data are already corrected for different effects (Bouillon et al. 2003)
- ◆ look direction table for the 12000 CCD elements expressed within the sensor coordinate frame
- ◆ data used for time synchronization like line sampling period and scene center time.

According to the „SPOT Satellite Geometry Handbook“ (SPOT IMAGE 2002) Lagrange interpolation of the ephemeris data and linear interpolation of the attitude data are recommended to calculate the exterior orientation for each scan line. For DEM production the exterior orientation is transformed to a local topocentric system (LTS) with a fundamental point located at the center of the image scene. For orthoimage production the exterior orientation is expressed in the Earth Centered Earth Fixed (ECEF) WGS84 Cartesian frame. The transformed data serve as input for DLR's processing software.

4. IMAGE MATCHING

Matching of the two images is performed purely in image space with DLR software. Details on this software are described in LEHNER ET AL. 1992. It relies on a 7-step image resolution pyramid and applies intensity matching in two forms: normalized correlation coefficient for pixel accuracy and subsequent local least squares matching (LLSQM) for refinement to subpixel accuracy (for mass points 0.1 to 0.3 pixel standard deviation). Interest points are generated with the Förstner operator and the homologous points are searched for in the other image. Only points with high correlation and quality figure are selected as tie points if bundle adjustment is applied and a less stringent criterion is valid for the usage as seed points for the subsequent Otto-Chau region growing procedure for dense matching (HEIPKE ET AL 1996). This local least squares matching starts with template matrixes of 13 x 13 pixels around the seed points with a step of 1 to 3 pixel in each direction. For cross checking a backward match is performed for all points found.

5. ORTHOIMAGE GENERATION AND ACCURACY ANALYSIS

To get an impression of the absolute and relative accuracy of the position and attitude data, and to get an estimation of the necessity to improve the ancillary data by bundle adjustment or other methods, orthoimages are derived using an already available DEM.

The inputs for the orthoimage production are the interior orientation (CCD look angles), the six parameters of the exterior orientation for each image line (interpolated from the measured sampling points) and the DEM. In the case of Bavaria the DEM has been derived by DLR from several ERS 1/2 Tandem pairs, the accuracy is in the order of 5 to 10 meter in flat and hilly terrain and 10 to 50 meter in mountainous terrain (ROTH ET AL. 1998). Therefore the more reliable part of the orthoimages is found north of the foot of the Alps.

The principle of the orthoimage production is based on the intersection of the actual sensor viewing direction (pointing vector) with the DEM applying the rigorous collinearity equation. The orthoimage processor calculates the object space coordinates of the points within the local topocentric system and then transforms them to the desired map projection of the output image using geodetic datum transformation parameters (MÜLLER ET AL. 2003). Bilinear resampling to a 10 x 10 m grid has been performed.

After generation of the two orthoimages without any ground control information, a check of the accuracy using 20 of the ground control points has been performed. For the quality assessment the measurements have been carried out in bilinearly enlarged orthoimages to achieve sub-pixel accuracy. Table 1 shows the deviation in x and y direction for the orthoimages in comparison to the control points.

Table 1: Mean values and standard deviations for the difference to the orthoimages of 20 ground control points in meter in Gauss-Krüger coordinate system (Bavaria)

x1, y1 – Coordinates of ground control points

x2, y2 – Coordinates in orthoimage from forward looking

x3, y3 – Coordinates in orthoimage from backward looking

	x2 – x1	y2 – y1	x3 – x1	y3 – y1
MEAN	-4,3	5.0	-14.3	11.5
Std. dev	5.89	7.35	6.23	8.64

The result shows that even without any ground control, the absolute georeferencing accuracy of the HRS sensor is better than 20 meter and standard deviation less than one pixel. This is expected, since the values for the absolute pointing accuracy is given by BOUILLON ET AL. 2003 to about 33 meters with 90% accuracy.

6. DEM PRODUCTION FROM TWO RAY STEREO DATA

Having the mass points from the matching process as well as the exterior and interior orientation of the camera system, the object space coordinates can be calculated using forward intersection. This is done by least squares adjustment for the intersection of the image rays. The irregular distribution of points in object space after the forward intersection is regularized into a equidistant grid of 15 to 50 meter spacing. The interpolation process is performed by a moving plane algorithm (LINDER 1999). The resulting DEMs, which are surface models, are compared to the reference DEMs, which are terrain models. Therefore a distinct difference is expected e.g. in forest areas.

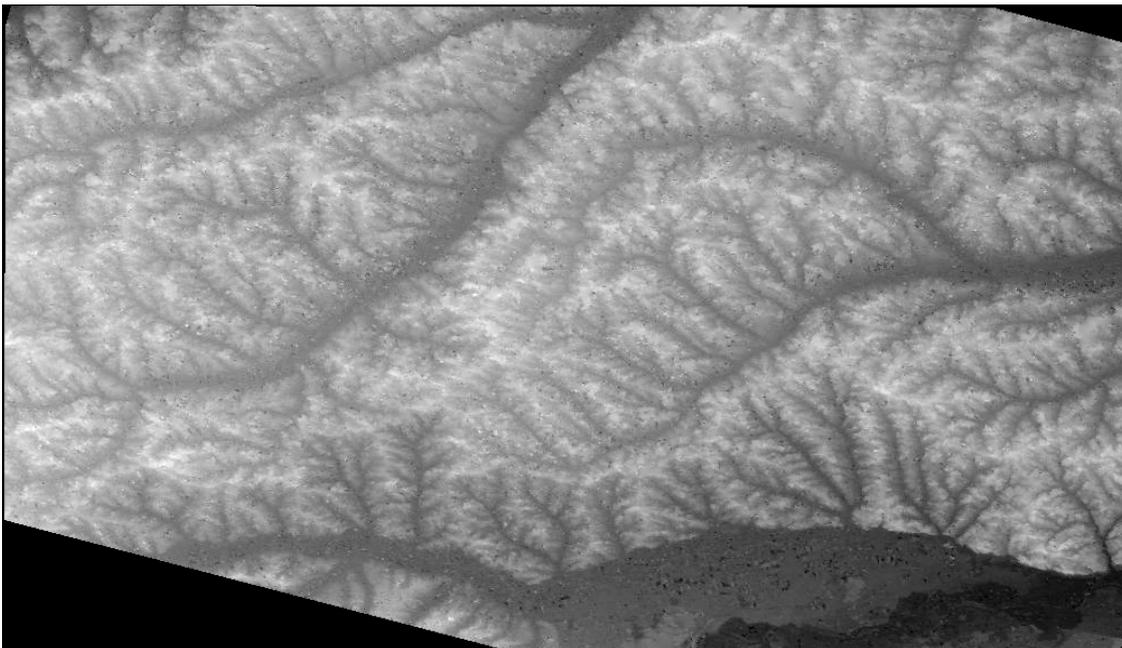


Figure 1: DEM from SPOT-HRS stereo data

In the test area of Bavaria six reference DEMs are available for testing the accuracy. The DEM calculated from HRS data for the largest area, #6 (size: 50 km x 30 km), east of Munich with moderate terrain, is shown in Fig. 1. The comparison of the derived DEMs to the reference DEMs is performed in several ways. At first only those points, which are found during the first matching process (LEHNER 1992), and therefore are highly accurate homologous points, are investigated. They are compared for all the areas where a reference DEM is present.

The result is shown in table 2. The mean height differences are due to absolute orientation errors, they seem to be very similar for all reference areas, and can be eliminated using bundle adjustment methods. The low standard deviation shows a very good agreement with the reference DEM. A second comparison is performed in using the regularized SPOT-DEM to perform an area oriented analysis.

Table 2: Comparison of height for high quality homologous points in SPOT-DEM and reference DEM

Reference area	Size and Accuracy of Ref-DEM	Mean Height Difference [m]	Std. Dev. [m]	Points [#]
DEM-01, Prien	5 x 5 km, 0.5 m	6.8	2.0	240
DEM-02, Gars	5 x 5 km, 0.5 m	6.2	2.2	184
DEM-03, Peterskirchen	5 x 5 km, 0.5 m	5.6	1.8	261
DEM-04, Taching	5 x 5 km, 0.5 m	4.9	2.0	254
DEM-05, Inzell	10 x 10 km, 5 m	5.7	3.5	458
DEM-06, Vilsbiburg	50 x 30 km, 2-3 m	6.1	3.6	15177

The area oriented approach should distinguish between at least two types of classes (forest and non-forest areas) because of the anticipated discrepancy between terrain models and surface models. The matched objectpoints inside a forest area are distributed among different height levels and therefore the standard deviation for their heights should be higher. Table 3 shows the result for two of the reference areas in Bavaria. The mean height differences are of the same order (around 6 meter) as for the single points in table 2. The standard deviations are much higher in this area due to lower matching accuracy of the densely matched points and due to interpolation errors in areas where the region-growing matching algorithm could not find enough well correlated points (e.g. low contrast). In the forest areas the mean differences are about 12 meter higher, what is due to the surface/terrain model discrepancy (see Fig. 2). Also the standard deviation is much higher in forest areas as was expected.



Figure 2. Left part: Map of the region. Right part: Difference DEM (SPOT DEM – Reference DEM): Bright: forest areas and some blunders, the black parts have no value in the reference DEM.

There are many filtering techniques which can be applied to the DEM data. For this paper two techniques have been applied: an analysis of the statistics of correlating points (kernels) such as variance and roundness (Förstner operator), and a median filter with a window size of 3 x 3 pixel. Table 3 shows that in all cases the filtering leads to significantly lower standard deviations and only little change in absolute differences. The higher change in forest areas is due to mismatching in these areas. Many falsely matched points are eliminated in the case of the first filter and blunders are eliminated by the median filtering.

Another possibility of comparison is to look at profiles of the DEMs along a given line. In the profiles, the structure of the DEM and its variability can be seen easily. Fig 3 shows the profiles along the same line for the SPOT DEM and the reference DEM. The rough structure of the profile is very similar, but there is more variability in the SPOT DEM (Fig. 3 data are without filtering!)

Table 3: Comparison of the regularized SPOT-DEM and the reference DEM for selected areas and two surface types (SPOT DEM – Reference DEM)

Reference area	Mean Height Difference [m] non-forest / STDV	Mean Height Difference [m] forest / STDV	Height-difference forest / non-forest
DEM-02	7.8 / 5.6	17.8 / 9.7	11.9
DEM-02 matching filter	8.5 / 4.8	15.0 / 8.0	7.5
DEM-02 median filter	8.0 / 3.9	17.2 / 8.2	9.2
DEM-06	6.5 / 6.5	19.0 / 9.0	12.5
DEM-06 median filtering	6.2 / 4.2	16.9 / 6.8	10.7

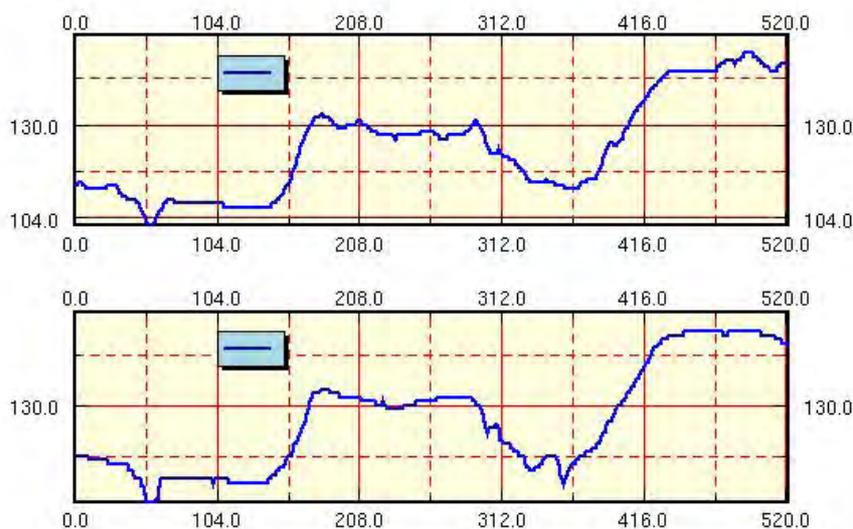


Figure 3. Profiles of SPOT-DEM (upper) and reference DEM (lower)

7. CONCLUSION

It could be shown that a stereoscopic evaluation of SPOT-HRS data, only using ancillary data delivered by the image provider, leads to an absolute accuracy of terrain heights in the order of 5 to 10 meter (mean height error), with standard deviations of about 2 to 4 meter for single points and 4 to 7 meter for the interpolated DEM in comparison to the reference DEM. The standard deviations are reduced by DEM filtering, which also leads to a smoother DEM. The relative accuracy of course depends on terrain steepness and land use classes, since image matching algorithms depend on these image features. Orthoimages can be derived to an absolute location accuracy of 1 to 2 pixels (10 to 20 meter) without ground control. The difficulty in getting sufficiently accurate and well distributed GCP stresses once more the benefits of highly accurate exterior orientation measurements.

8. REFERENCES

- A. BOUILLON, E. BRETON, F. DE LUSSY, R. GACHET, "SPOT5 Geometric Image Quality", IGARSS 2003, Toulouse, 21.-25. July 2003, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium
- C. HEIPKE, W. KORNUS, A. PFANNENSTEIN, "The evaluation of MEOSS airborne 3-line scanner imagery – processing chain and results", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 62, No. 3, pp. 293-299, 1996
- M. LEHNER, R.S. GILL, "Semi-automatic derivation of digital elevation models from stereoscopic 3-line scanner data", IAPRS, Vol. 29, Part B4 Washington, USA pp. 68-75, 1992
- W. LINDER, "Geo-Informationssysteme", Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, Germany, ISBN 3-540-65276-0, 1999
- RA. MÜLLER, M. LEHNER, RU. MÜLLER, "Verification of Digital Elevation Models from MOMS-2P data" Proceedings of the ISPRS Workshop "High Resolution Mapping from Space 2001", Hannover, Germany, on CD-ROM, September 2001
- RU. MÜLLER, G. PALUBINSKAS, P. REINARTZ, M. SCHROEDER, V. AMANN, R. STÄTTER, "From Airborne Digital Raw Data to Image Maps" PFG Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, Germany, 4, 4, (2003), S. 317-326
- P. REINARTZ, M. LEHNER, RU. MÜLLER, M. SCHROEDER, "First Results on Accuracy Analysis for DEM and Orthoimages Derived from SPOT HRS Stereo Data over Bavaria", Proceedings of the ISPRS Workshop High Resolution Mapping from Space, Hannover, Oct. 6.-8. 2003, IPI, Uni Hannov., on CD
- A. ROTH, W. KNOEPFLE, S. GEBHARDT, B. RABUS, D. SCALES, "Evaluation of Interferometric Digital Elevation Models Derived from ERS Tandem Data" ISPRS Commission II Symposium, Cambridge, UK, 13.-17.7.1998, ISPRS, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, S. 242-247, (1998)
- SPOT IMAGE, "SPOT Satellite Geometry Handbook", S-NT-73-12-SI, Edition 1, Rev. 0, Toulouse, France 2002
- T. TOUTIN, P. CHENG, "DEM Generation with ASTER Stereo Data", Earth Observation Magazine, Vol. 10, No. 6, pp. 10-13, June 2001

Stand des EuroSDR-Projektes Digitale Kameras

HARTMUT ZIEMANN¹ & DANIEL GROHMANN²

Ein EuroSDR-Projekt mit dem Ziel, in der Anwendung digitaler Luftbildkameras Erfahrungen auch im Vergleich zur Verwendung herkömmlicher Filmkameras zu gewinnen, wird vorgestellt. Erläutert werden die Projektziele, die für das Projekt in Erwägung gezogenen Aufnahmesysteme, das gewählte Projektgebiet mit einer Begründung seiner Wahl und die gewählten Projektparameter. Eine erfolgreiche Projektdurchführung sollte Erfahrungen für die Planung zukünftiger Projekte, die mit digitalen Kameras ausgeführt werden, und für Bemühungen zur Entwicklung von Kalibrier- und Validierungsverfahren liefern.

1 Einführung

Ein EuroSDR-Projekt wird mit seinen Zielstellungen, den zu untersuchenden Systemen, dem Projektgebiet und den Projektparametern mit deren Ableitung dargestellt. EuroSDR ist ein Zusammenschluss von nationalen Vermessungsbehörden, akademischen Instituten, der Industrie und anderen interessierten Gruppen und beschäftigt sich mit Fragen der europäischen Dateninfrastruktur. Der Zusammenschluss wurde 1953 gemäß Empfehlungen des Rates der Organisation für Europäische Ökonomische Zusammenarbeit als Europäische photogrammetrische Forschungsorganisation, kurz OEEPE, gegründet. Seine Arbeit wird durch Kommissionen organisiert, die ihrerseits Projekte initiieren. Das Projekt „Test digitaler Luftbildkameras – Leistungsfähigkeit von Hard- und Software“ der Kommission 3 (Produktionssysteme und -prozesse) ist Gegenstand dieses Berichtes.

2 Digitale Luftbildkameras

Digitale Luftbildkameras verwenden CCDs zur Datenaufzeichnung. Sie können in zwei Gruppen eingeteilt werden: Rahmenkameras, die quadratische oder rechteckige Sensoren verwenden und Eigenschaften ähnlich jenen von herkömmlichen Filmkameras haben und Mehrzeilenkameras mit einer grundsätzlich anderen Geometrie. Fünf unterschiedliche Systeme werden hier betrachtet: zwei Mehrzeilenkameras (ADS40, HRSC), Mehrfachobjektivkameras mit Flächensensoren (DMC, UltrCamD) und einer Einobjektivkameras mit Flächensensor (DSS).

Die Leica Geosystems ADS40 wurde in Zusammenarbeit mit dem DLR unter Verwendung des 3-Zeile-Konzepts unter Verwendung linearer CCDs mit je 12000 Bildelementen von je ($6,5 \mu\text{m}^2$) Größe entwickelt. Zwei um eine halber Bildelementgröße versetzte Sensoren erzeugen ein panchromatisches Senkrechtbild. Panchromatische Stereobilder werden durch je einen Sensor mit $28,4^\circ$ Vorwärtsblick und $14,2^\circ$ Rückwärtsblick erhalten. Bei einer Datenübertragungsrate von 800Hz ergibt sich für eine Flughöhe von 1920 m und eine Flugeschwindigkeit von 133 Knoten = 247 km/h = 68,5 m/s zur Erzeugung quadratischer Bodenbildelemente deren Größe zu $(10 \text{ cm})^2$. Eine Kamerakonstante von $c=62,4 \text{ mm}$ ergibt einen Bildmaßstab von 1:30769 und eine Aufnahmestreifenbreite von 2400m. Zusätzlich zu den

¹ Prof. Dr. Hartmut Ziemann, Fachbereich Vermessungswesen, Hochschule Anhalt (FH), Postfach 2215, 06818 Dessau, e-mail: hziemann@vw.hs-anhalt.de

² Dipl.-Ing. (FH) Daniel Grohmann, Gropius-Institut e.V., Postfach 2215, 06818 Dessau, e-mail: grohmann@vw.hs-anhalt.de

panchromatischen (465 – 680 nm) Zeilen sind Zeilen für die Aufnahme von Farbteilbildern gegeben: für Blau (430 – 490 nm), Grün (535 – 585 nm) und Rot (610 – 660 nm) liegen diese z.B. bei 14,2° und für nahes Infrarot (835 – 885 nm) bei 2°.

Die HRSC hochauflösende Stereokamera wurde für eine (nicht erfolgreiche) Marsmission durch das DLR entwickelt. Erste Versuche mit einer flugzeuggetragenen Kamera erfolgten 1997. Deren Erfolg veranlasste eine Weiterentwicklung zur HRSC-AX. Lineare Sensoren mit den gleichen geometrischen Eigenschaften wie bei der ADS40 werden verwendet. Stereoaufnahmen werden mit drei Zeilen erzeugt, einer Senkrechtaufnahme und je einem Vor- und Rückblick unter 20,5°. Eine Kamerakonstante von $c=150$ mm wird verwendet. Zusätzlich zu den panchromatischen (520 – 760 nm) Zeilen sind Zeilen für die Aufnahme von Farbteilbildern gegeben: für Grün (530– 570 nm) und Rot (635 – 685 nm) liegen diese bei + bzw. - 2,3° und für Blau (450– 510 nm) und nahes Infrarot (770 – 810 nm) bei + bzw. - 4,6°. Zwei weitere panchromatische Zeilen mit einem Vor- bzw. Rückblick von 12,0° erleichtern die Auswertung in kritischen Gebieten.

Die DMC von Z/I-Imaging verwendet vier CCDs der Größe 7168×4096 mit $(12 \mu\text{m})^2$ großen Bildelementen zur Aufnahme eines hochauflösenden panchromatischen Bildes, aus denen ein Bild der Größe 13824×7680 abgeleitet wird. Die größere Seite des 166×92 mm² großen Formats liegt quer zur Flugrichtung. Die Kamerakonstante beträgt 120 mm. Vier weitere Kameras mit 3072×2046 Bildelementen² großen Flächensensoren und $c= 25$ mm nehmen Farbteilbilder auf, und zwar Blau (400 – 580 nm), Grün (500 – 650 nm), Rot (590 – 675 nm) und nahes Infrarot (675 – 850 nm).

Die UltraCamD von Vexcel Imaging verwendet neun CCDs der Größe 4008×2672 mit $(9 \mu\text{m})^2$ großen Bildelementen zur Aufnahme „synoptischer“ panchromatischer Bilder durch vier Objektive, die zu einem Bild der Größe 11500×7500 kombiniert werden. Die Kamerakonstante beträgt $c=100$ mm. Vier weitere Kameras mit 4008×2672 Bildelementen² großen Flächensensoren und $c= 25$ mm nehmen Farbteilbilder auf, und zwar Blau, Grün, Rot und nahes Infrarot.

Der DSS von Applanix verwendet einzelne Dreifarben-CCDs der Größe 4077×4092 und eine Kamerakonstante von $c= 55$ mm; $c= 35$ mm ist als Option verfügbar. Der Sensor kann entweder ein Echtfarben- (B,G,R) oder ein Falschfarbensensor (G,R,NIR) sein.

3 Projektgebiet

Das erweiterte Mündungsgebiet der Mulde in die Elbe wurde als Projektgebiet gewählt. Dieses Gebiet erlebte im August 2002 eine Jahrhundertflut als Ergebnis fast gleichzeitiger extremer Hochwasser an Mulde und Elbe. Seinerzeit stand für Zwecke der Hochwasserbekämpfung, auch als Folge eines Deichbruches, und für Planungen von Deichsprengungen zur Leerung entstandener Polder kein Geländemodell ausreichender punktdichte und -genauigkeit zur Verfügung. Erwartungen, für die Erzeugung eines solchen Modells Unterstützung durch die Landesregierung aus Hochwassermitteln zu erhalten, erfüllten sich trotz aktiver Unterstützung durch die Stadt Dessau nicht.

Das Projektgebiet ist Teil des UNESCO Biosphärenreservats Mittlere Elbe, das den größten Auenwald in Zentraleuropa beinhaltet. Innerhalb dieses Gebietes liegt auch das Gartenreich Dessau-Wörlitz, ein UNESCO Weltkulturdenkmal, dessen Parks und herausragenden Gebäude oft durch Sichtkorridore miteinander verbunden sind. Zurzeit werden die Deiche allgemein

erhöht, allerdings soll dies dann nicht geschehen, wenn dadurch historische Sichtverbindungen gestört werden.

Das Gebiet wird so gewählt, dass kritische Pegel an Elbe (Pratau, Dessau, Aken) und Mulde (Raguhn, Dessau) auf Wunsch von Wasserbauern berücksichtigt werden. Damit ergibt sich eine Größe von 42×20 km². Die Gebietsgrenzen sind:

Westen: 12°03'10", Osten: 12°40'02" (östliche Längen),

Norden: 51°54'06", Süden: 51°42'18" (nördliche Breiten).

Kleinere sinnvolle Gebiete wären zum Beispiel das zum Rechteck erweiterte Gartenreich (25×15 km²) oder das Mündungsgebiet (17×10 km²).

4 Projektparameter

Es wird angenommen, dass bei der photogrammetrischen Auswertung an einem Analytischen Auswertegerät bei Verwendung der statischen Rastermethode Höhengenaugigkeiten von $\sigma_Z = \pm 0,15\% \times c \times m_B$ erzielt werden können, und dass bei Laserscanneraufnahmen Höhengenaugigkeiten von $\sigma_Z = \pm 15$ cm erzielt werden. Erste DMC-Ergebnisse deuten eine Genauigkeit von $\sigma_Z = \pm 0,08\% \times c \times m_B$ an.

Die ADS40 ist von den in Erwägung gezogenen Kameras diejenige, mit der großmaßstäbige Aufnahmen am schwierigsten zu realisieren sind. Daher wird die bei der Systembeschreibung für die ADS40 abgeleitete Aufnahmestreifenbreite als Grundlage auch für die Aufnahmeplanung der anderen Systeme verwendet, denn im Hinblick auf eine Signalisierung von Pass- und Kontrollpunkten bieten sich die gleichen Aufnahmelinien an. Die Streifenbreite wird mit folgenden Bildmaßstäben erzielt: HRSC-AX 1: 30 770, DMC 1: 14 285, UltraCamD 1: 23 188, DSS 1: 65 168 und herkömmliche Filmkamera 1: 10 435. Die entsprechenden Flughöhen sind 1923m, 4616 m, 1714 m, 2319 m, 3584 (oder 2281) m and 1597 m (für $c = 153$ mm). Für die Filmkamera ergibt sich eine zu erwartende Höhengenaugigkeit von $\sigma_Z = \pm 0,15\% \times c \times m_B = \pm 24$ cm und für die DMC $\sigma_Z = \pm 0,08\% \times c \times m_B = \pm 14$ cm.

Die Bildelementgrößen ergeben sich für die verschiedenen Aufnahmesysteme wie folgt: ADS40 (10 cm)², HRSC-AX (20 cm)², DMC (17 cm)², UltraCamD (21 cm)², DSS (59 cm)² und Filmkamera (15 cm)², wenn mit einer Bildelementgröße von (14 μm)² gescannt wird. Als Vergleich sei darauf hingewiesen, dass das Landesamt für Landesvermessung und Geoinformation (LVerM) Sachsen-Anhalt mit Orthophotos mit einer Bildelementgröße von (40 cm)² arbeitet.

Bei Verwendung einer Querüberdeckung von 30% und einer Längsüberdeckung von 60% im Falle von Rahmenkameras ergeben sich zur Aufnahme des Projektgebietes 12 Fluglinien von je 42 km Länge und 80 DMC-, 67 UltraCamD-, 44 DSS- und 44 Filmkameraaufnahmen. Einige Querflugstreifen sind ebenfalls vorgesehen.

5 Projektstatus

Das digitale Luftbildkameraprojekt wurde im November 2001 im Hinblick auf die Notwendigkeit, für das Projektgebiet ein DGM zu erstellen, initiiert, weil ein DGM zum Beispiel als Grundlage für die Ableitung eines Grundwassermodells dringend benötigt wird. Die Flut vom August 2002 hat nochmals nachhaltig den Bedarf für ein DGM mit großer Punktdichte und hinreichender Genauigkeit unterstrichen. Das ursprünglich vorgesehene Projektgebiet wurde

auf Betreiben der Stadt Dessau erweitert. Bemühungen einer Finanzierung aus Landesmitteln sind trotz positiver Gutachterbescheide und der Unterstützung der Stadt Dessau unter anderem mit Hinweis auf die beim LVerMG vorliegenden DGM-Daten gescheitert. Aus diesem Grunde wird nun nicht nur versucht, Projektmittel einzuwerben sondern auch, das Projekt mit Unterstützung von Sponsoren voran zu bringen.

Erste Missionen werden im kommenden Herbst durchgeführt.

6 Kamerakalibrierung und -validierung

Die Arbeitsgruppe Kalibrierung und Validierung von CEOS (The Committee on Earth Observation Satellites, eine internationale koordinierende Organisation von zur Zeit 23 Mitgliedern, vor allem Weltraumorganisationen, und 21 assoziierten Mitgliedern, nationalen oder internationalen Organisationen wie die Internationale Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, mit der Aufgabe der Koordinierung ziviler Missionen zur Beobachtung und zum Studium der Erde) hat folgende Definitionen eingeführt:

- Kalibrierung ist der Prozess der quantitativen Bestimmung des Verhaltens eines Systems auf bekannte Signale,
- Validierung ist der Prozess der Bewertung der von Systemen erzeugten Datenprodukte mit unabhängigen Verfahren.

Es ist offensichtlich, dass die für die Kalibrierung von herkömmlichen Luftbildkameras verwendeten Verfahren im Hinblick auf die Komplexität der digitalen Kamerasysteme erweitert werden müssen; möglicherweise müssen für jeden digitalen Kameratyp gesonderte Verfahren entwickelt werden. Die Verwendung von Testfeldern zur Kamerakalibrierung wird damit interessanter. Da die von den Kameras erzeugten Rohdaten vor ihrer photogrammetrischen Verarbeitung aufbereitet werden müssen, wird die bisher in der Photogrammetrie nicht übliche Validierung in Zukunft eine zunehmende Rolle spielen. EuroSDR hat ein Projekt Kalibrierung digitaler Kameras mit zwei Aufgaben initiiert:

- Sammlung verfügbaren Materials zur Kamerakalibrierung und Erstellung eines Berichtes über die zur Zeit verwendeten Verfahren,
- Versuche mit der Zielstellung der Entwicklung allgemein akzeptierter Verfahren für das Kalibrieren und Testen digitaler Kameras.

Es kann erwartet werden, dass das digitale Luftbildkameraprojekt Erfahrungen im Hinblick auf die Entwicklung von Kalibrierungs- oder Validierungsverfahren beitragen wird.

8 Referenzen

<http://www.biosphaerenreservatmittlereelbe.de/frameset.htm> ⇒ Biosphärenreservat ⇒ Biosphärenreservat Flusslandschaft Mittlere Elbe

<http://www.eurocdr.org/2002/index.htm> ⇒ Research ⇒ Current projects ⇒ Commission 3 Test for digital cameras ...

<http://www.hziemann.de> ⇒ direct link to EuroSDR Project

<http://www.ceos.org/pages/terms.html> ⇒ Terms of Reference ⇒ Working Group on Calibration and Validation

Simulationsansätze für das Wasserdampf-Differential-Absorptions-Lidarsystem WALES

ANKO BÖRNER¹, HARTWIG HETZHEIM², CHRISTOPH KIEMLE³, LAURENT LAPORTE⁴ & MARTIN WIRTH⁵

Zusammenfassung: Wasserdampf ist ein Bestandteil der Erdatmosphäre, der wesentlichen Einfluss auf Wetter und Klima hat. Darüber hinaus spielt Wasserdampf eine zentrale Rolle in der Chemie der Atmosphäre.

Wasserdampf-Differential-Absorptions-Lidarsysteme (DIAL) sind vom Boden und vom Flugzeug aus seit etwa zwei Jahrzehnten im Einsatz. Gestützt auf die durch langjährige DIAL-Messungen gewonnenen Expertise schlug die DLR Lidargruppe WALES (Water vapour Lidar Experiment in Space) für eine „ESA Earth Explorer Opportunity“ Mission vor. Zur Unterstützung dieses Proposal hat das DLR ein Projekt für ein flugzeuggetragenes Lidar initiiert.

Simulationsansätze stellen einen Schwerpunkt bei der Vorbereitung von komplexen Projekten, vor allem für den Einsatz im Weltraum, dar. Sie gestatten die Optimierung von Systemparametern und Beobachtungsbedingungen, die Entwicklung und den Test von Auswertalgorithmen sowie eine Abschätzung des Potentials des Gesamtsystems.

Der Beitrag beschreibt die physikalischen Grundlagen eines DIAL-Systems und das WALES-Konzept. Simulationsansätze werden vorgestellt und erste Ergebnisse präsentiert.

1 Einleitung

Wasserdampf ist ein Bestandteil der Erdatmosphäre, der wesentlichen Einfluss auf Wetter und Klima hat. Darüber hinaus spielt Wasserdampf eine zentrale Rolle in der Chemie der Atmosphäre. Wasserdampf ist das dominierende Treibhausgas. Trotz seiner Bedeutung für atmosphärische Prozesse in einem breiten räumlichen und zeitlichen Skalenbereich, ist Wasserdampf eine der am wenigsten verstandenen und gemessenen Komponenten der Erdatmosphäre.

Es existieren verschiedene Methoden, die Wasserdampfkonzentration zu messen - direkte (z.B. insitu-Messungen mit Hilfe von Ballons) und indirekte. Bei den indirekten Methoden wird zwischen passiven (z.B. abbildende Spektrometer) und aktiven Sensoren unterschieden. Dieser Beitrag beschäftigt sich mit einem aktiven System, das auf dem Lidar-Messprinzip basiert (Lidar = Light detection and ranging). Dabei wird von einem Sender ein zeitlich kurzer Laserpuls in die Atmosphäre ausgesandt. Das Licht wird dort an Gasmolekülen gestreut. Ein Teil des Lichts wird von einem Empfänger aufgefangen und analysiert.

Ein DIAL-System (DIAL = Differential Absorption Lidar) misst gleichzeitig mit zwei Wellenlängen, eine liegt direkt auf einer Absorptionslinie eines zu untersuchenden Gases (online), die zweite dicht daneben (offline). Durch Differenzbildung werden verschiedene Hintergrund- und Systemeffekte eliminiert und nur die Konzentration des Gases gemessen.

¹ Dr. Anko Börner, Einrichtung Optische Informationssysteme, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin, e-mail: anko.boerner@dlr.de

² Dr. Hartwig Hetzheim, Einrichtung Optische Informationssysteme, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin, e-mail: hartwig.hetzheim@dlr.de

³ Christoph Kiemle, Institut für Physik der Atmosphäre, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen, 82234 Weßling, e-mail: christoph.kiemle@dlr.de

⁴ Laurent Laporte, Einrichtung Optische Informationssysteme, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin

⁵ Dr. Martin Wirth, Institut für Physik der Atmosphäre, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen, 82234 Weßling, e-mail: martin.wirth@dlr.de

Wasserdampf-DIAL-Systeme sind vom Boden und vom Flugzeug aus seit etwa zwei Jahrzehnten im Einsatz. DIAL-Technologie und Anwendung haben in diesem Zeitraum bedeutende Fortschritte erfahren. Das deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt hat langfristige Erfahrung bei der Entwicklung und im Betrieb von flugzeuggetragenen DIAL-Systemen. Im DLR-Institut für Physik der Atmosphäre werden solche Systeme entworfen, aufgebaut und seit 1989 regelmäßig bei Messkampagnen eingesetzt. Die Einrichtung Optische Informationssysteme unterstützt diese Aktivitäten durch eigene Beiträge.

2 WALES

Gestützt auf die durch langjährige DIAL-Messungen gewonnenen Expertise schlug die DLR Lidargruppe WALES (Water vapour Lidar Experiment in Space) für eine „ESA Earth Explorer Opportunity“ Mission vor. Zur Unterstützung dieses Proposal hat das DLR ein Projekt für ein flugzeuggetragenes Lidar initiiert.

Abbildung 1 veranschaulicht das WALES-Systemkonzept. Die drei für verschiedene Höhen-schichten optimierten Lasersysteme mit unterschiedlichen Online-Wellenlängen und ein Laser auf einer Offline-Wellenlänge bilden das Kernstück des Gesamtsystems. Die Auswertung der Daten gestattet die Erstellung von Vertikalschnitten durch die Erdatmosphäre und die höhenaufgelöste Bestimmung von Wasserdampfprofilen (unten rechts).

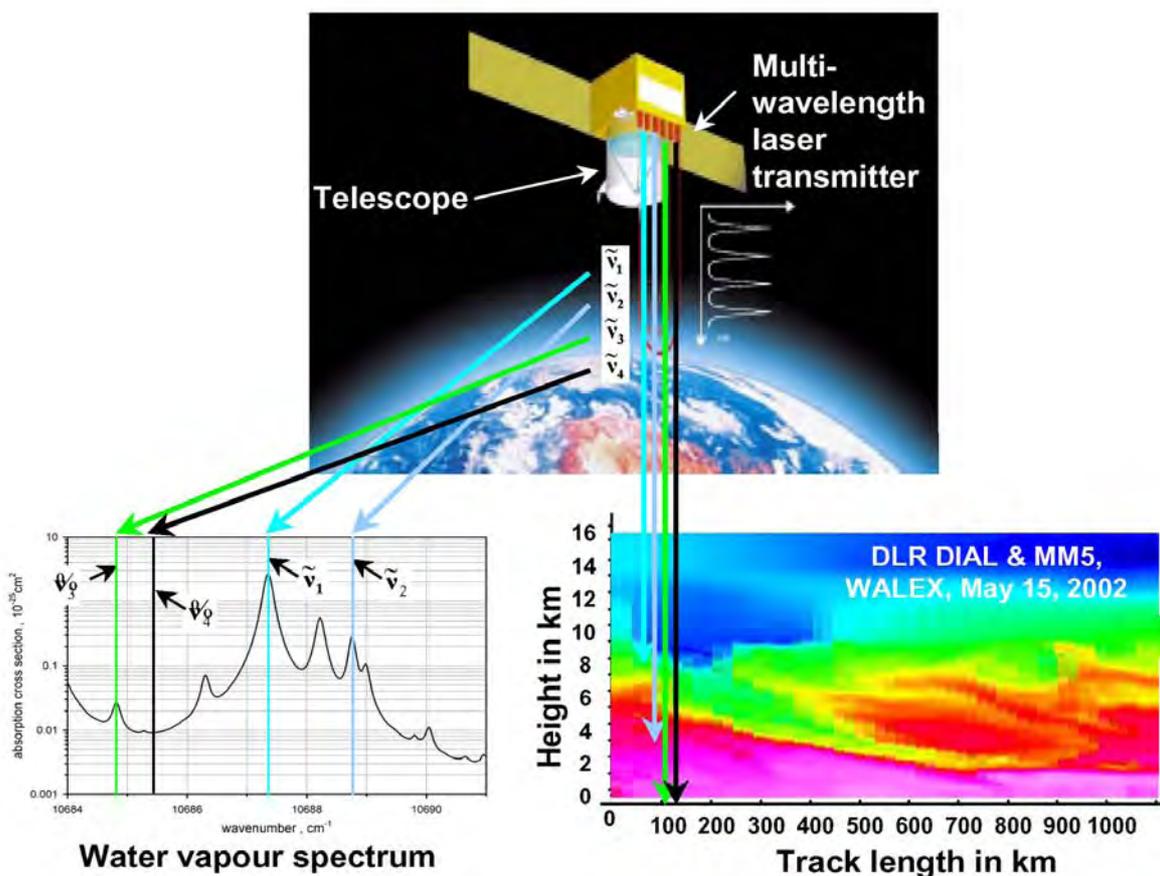


Abb. 1: WALES-Systemkonzept: Satellitenmission (oben), Absorptionsquerschnitt ausgewählter H₂O-Linien (links unten), vertikales Wasserdampfprofil (rechts unten)

Die nachfolgende Abbildung 2 beschreibt das Blockschaltbild des WALES-Instruments.

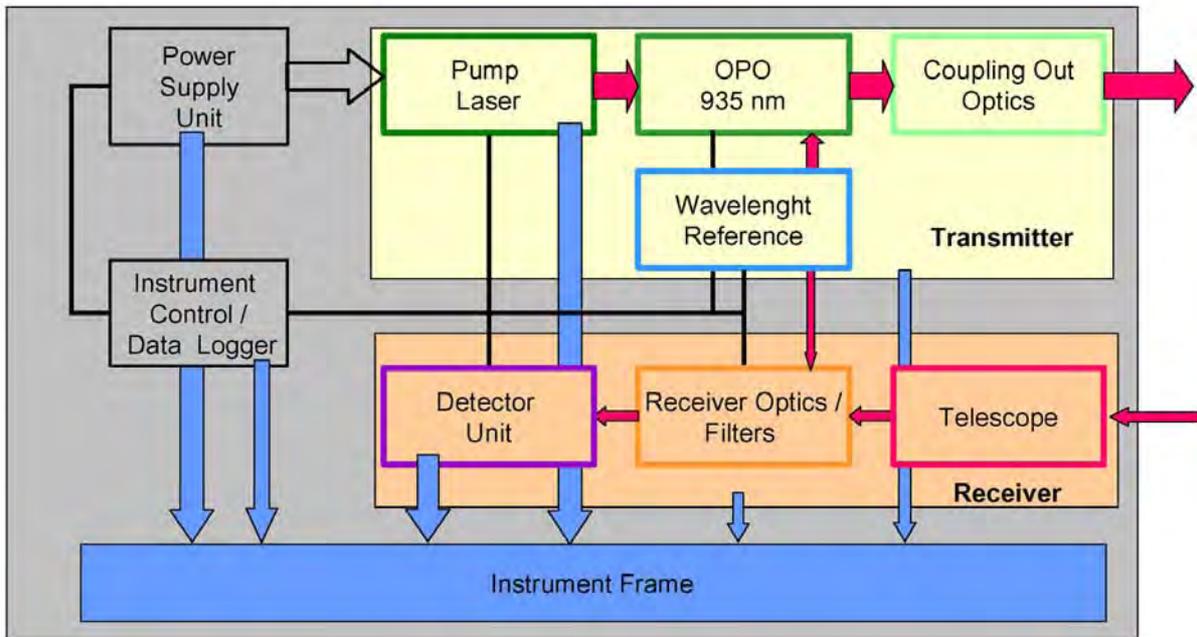


Abb. 2: WALES-Blockschaltbild

3 End-To-End-Simulation

Inhalt dieses Artikels ist die Beschreibung eines flexiblen End-To-End-Simulators für ein DIAL-System, der auf der physikalischen Modellierung der Atmosphäre und des Sensors basiert. Das WALES-Projekt dient dabei als Referenzsystem.

Grundsätzlich ist bei der Betrachtung komplexer Systeme immer wieder die Frage zu beantworten, wie bestimmte Systemparameter optimiert werden können. Prinzipiell sind drei Herangehensweisen denkbar: im Falle einfacher Zusammenhänge zwischen Input- und Output-Größen können simple mathematisch-physikalische Modelle herangezogen werden. Beispielsweise lässt sich der Zusammenhang zwischen Apertur und Signal-Rausch-Verhältnis leicht darstellen. Eine zweite Methode ergibt sich durch die Nutzung von Bread Boards (z.B. für die Untersuchungen von geeigneten Schock-Mounts). Die dritte Möglichkeit besteht darin, mit Hilfe von Software alle wesentlichen Effekte durch physik-basierte Modelle zu beschreiben. Diese Modelle beschreiben das Untersuchungsobjekt, seine Umgebung und den Sensor. Eine Simulation ist dann in der Lage, komplexe Zusammenhänge zu verdeutlichen. Dieser Ansatz ist vor allem vielversprechend, wenn die beiden erstgenannten Methoden nicht oder nur mit enormen Aufwand zu realisieren sind (BÖRNER, 2001).

Ein End-To-End-Simulator erfordert die Beschreibung einer kompletten Systemkette. Dazu sind die benötigten Auswertelgorithmen in die Untersuchungen zu integrieren.

3.1 Vorwärts-Rechnung

Die Vorwärtsrechnung beschreibt die Ausbreitung eines Signals von der Quelle, durch die Atmosphäre, zum Objekt, durch die Atmosphäre und schließlich zum Sensor. Unter Annahme einer spektralen Leistungsdichte \hat{P}_0 des Lasers und einer Transmission zwischen Sender und Objekt τ_0 wird an einem streuenden /absorbierenden Objekt die orts aufgelöste Leistung

$$P_{down}(r) = \int \tau_0(v_0, r) \hat{P}_0(v_0, t - \frac{r}{c}) dv_0$$

empfangen, wobei t die Zeit, r den Weg, c die Lichtgeschwindigkeit und v_0 die zentrale Laserwellenlänge darstellen.

Unter Annahme eines rückstreuenden Mediums ergibt sich bei Betrachtung des zeitaufgelösten Signals am Detektor ergibt sich folgende Gleichung:

$$P(t) = \frac{c}{2} \frac{A}{r^2} O(r) \iint D(\nu_r) \tau_r(\nu_r, r) \beta(\nu_0, \nu_r, r) \tau_0(\nu_0, r) E(\nu_0) d\nu_0 d\nu_r$$

- mit A - Apertur des Empfängers,
 $O(r)$ - Overlap-Funktion zur Beschreibung der Ausrichtung von Empfangsoptik und Laserquelle zueinander,
 ν_r - Zentralwellenlänge des rückgestreuten Signals,
 $D(\nu_r)$ - Spektrale Detektorempfindlichkeit,
 $\tau(\nu_r)$ - Transmission vom Objekt zum Empfänger,
 $\beta(\nu_r)$ - Rückstreu-Funktion,
 $E(\nu_0)$ - Spektrale Energie des Lasers.

Existiert eine Komponente der Relativgeschwindigkeit zwischen Streumedium und DIAL-System in Laserausbreitungsrichtung $\vec{v}(r)$, muss der Dopplereffekt berücksichtigt werden.

$$\kappa = \sqrt{\frac{1 + \frac{\vec{v}(r)}{c}}{1 - \frac{\vec{v}(r)}{c}}} \approx 1 + \frac{\vec{v}(r)}{c}$$

Dann ergibt sich für die am Detektor empfangene Leistung folgender Ausdruck:

$$P(t) = \frac{c}{2} \frac{A}{r^2} O(r) \iint D(\kappa \nu_r) \tau_r(\nu_r, r) \beta(\nu_0, \nu_r, r) \tau_0(\nu_0, r) E(\kappa^{-1} \nu_0) d\nu_0 d\nu_r$$

Die Betrachtungen des Systems im Wellenlängen- und Wellenzahlbereich sind äquivalent. Da sich aber Parameter in der Atmosphärenphysik in der Regel auf Wellenzahlen stützen, wird sich auch in diesem Beitrag auf die entsprechenden Wellenzahlen $\tilde{\nu}_0$ und $\tilde{\nu}_r$ bezogen.

Die Rückstreu-Funktion besteht aus zwei Anteilen – einem, der durch Rayleigh-Effekte (β_R) verursacht wird und einem, der die Mie-Streuung beschreibt. Während sich der Mie-Anteil mathematisch mit Hilfe eines Dirac-Stoßes $\hat{\delta}$ beschreiben lässt, wird bei der Beschreibung des Rayleigh-Anteils auf ein druckverbreitertes Lorenz-Profil b zurückgegriffen.

$$\beta(\tilde{\nu}_0, \tilde{\nu}_r, r) = \beta_M(r) \hat{\delta}(\tilde{\nu}_0 - \tilde{\nu}_r) + \beta_R(r) b(\tilde{\nu}_0 - \tilde{\nu}_r, r)$$

Die Transmission in beide Richtungen ergibt sich aus der optischen Dicke des Mediums δ , die wiederum durch die über die Entfernung aufintegrierten Extinktionskoeffizienten α beschrieben wird.

$$\tau(\tilde{\nu}, r) = \exp(-\delta(\tilde{\nu}, r)) = \exp\left(-\int_0^r \alpha(\tilde{\nu}, r') dr'\right)$$

Der Extinktionskoeffizient setzt sich aus Streu- und Absorptionsanteilen zusammen. Bei den Streuprozessen kommen wie erwähnt sowohl Rayleigh- als auch Mie-Prozesse an den Luftmolekülen zum Tragen, der wesentliche Anteil bei der Absorption wird durch Spurengase (in unserem Fall H₂O) generiert. Damit ergibt sich der Extinktionskoeffizient aus

$$\alpha(\tilde{\nu}, r) = \alpha_{sR}(r) + \alpha_{sM}(r) + a_{aG}(\tilde{\nu}, r)$$

wobei $\alpha_{sR}(r)$ den Rayleigh-Streuanteil, $\alpha_{sM}(r)$ den Mie-Streuanteil und $a_{aG}(\tilde{\nu}, r)$ den Absorptionsanteil durch die Spurengasmoleküle darstellen.

Der Absorptionskoeffizient wiederum erfasst alle in einem bestimmten Wellenzahl-Bereich relevanten Absorber-Moleküle für m Spurengase und den dazugehörigen i Absorptionslinien.

$$\alpha_{aG}(\tilde{\nu}, r) = \sum_{i,m} \rho_m(r) \sigma_m^i(\tilde{\nu}, r)$$

wobei ρ_m die Anzahl der Absorbermoleküle pro Volumeneinheit beschreibt. Der Absorptionsquerschnitt $\sigma_m^i(\tilde{\nu}, r)$ für eine bestimmte Absorptionslinie eines Moleküls besteht aus dem Produkt von Linienstärke und Formfunktion

$$\sigma_m^i(\tilde{\nu}, r) = S^i(r) g_m^i(\tilde{\nu}, r)$$

wobei

$$S^i(r) = S_0^i \left(\frac{T_0(r)}{T(r)} \right)^m \exp \left[\frac{E_0^i}{k_B} \left(\frac{1}{T_0(r)} - \frac{1}{T(r)} \right) \right]$$

- mit S_0^i - Linienstärke unter normierten Bedingungen (Labormesswert, z.B. HITRAN),
 $T(r)$ - Temperatur,
 $T_0(r)$ - Referenztemperatur,
 m - molekülspezifischer Exponent (z.B. für H₂O 1.5),
 E_0^i - Energie eines für die Linie i charakteristischen Rotations- oder Vibrationsübergangs,
 k_B - Boltzmannkonstante.

Die Formfunktion entsteht aus einer Faltung zwischen zwei Funktionen zur Beschreibung von Lorentz- und Dopplerprofil. Die resultierende Funktion (g_m^i) wird Voigt-Profil genannt.

$$g_m^i(\tilde{\nu}, r) = g_L^i(\tilde{\nu}, r) \otimes g_D^i(\tilde{\nu}, r)$$

Das Lorentzprofil beschreibt die Druckverbreiterung.

$$g_L^i(\tilde{\nu}, r) = \frac{\gamma_L^i(\tilde{\nu}, r) / \pi}{(\tilde{\nu} - \tilde{\nu}_0)^2 + (\gamma_L^i(\tilde{\nu}, r))^2}$$

Die Lorentz-Halbwertsbreite γ_L^i berechnet sich aus

$$\gamma_L^i(\tilde{\nu}, r) = \gamma_L^i(P, p_s, r) = \left(\gamma_L^{(i,0,air)}(P(r) - p_s(r)) + \gamma_L^{(i,0,s)} p_s(r) \right) \cdot \left(\frac{T_0(r)}{T(r)} \right)^{n_i}$$

wobei P den Luftdruck, p_s den Partialdruck des Spurengases und $\gamma_L^{i,0,air}$ und $\gamma_L^{i,0,s}$ die Halbwertsbreite der Luft- bzw. der Gasmoleküle darstellen.

Das Dopplerprofil entspricht einer Gauß-Funktion

$$g_D^m(\tilde{\nu}, r) = \frac{1}{\gamma_D^m(r)} \left(\frac{\ln 2}{\pi} \right)^{1/2} \exp \left(-\ln 2 \left(\frac{\tilde{\nu} - \tilde{\nu}_0}{\gamma_D^m(r)} \right)^2 \right)$$

mit der Doppler-Halbwertsbreite

$$\gamma_D^m(r) = \gamma_D^m(T) = \tilde{\nu}_0 \sqrt{\frac{2 \ln 2 k_B T}{mc^2}}$$

Über diesen komplexen Ansatz ist das zu erwartende Signal am Detektor zu berechnen. Aus Kenntnis der spektralen Empfindlichkeitsfunktionen von Filter, Optik und Detektor sowie der Systemcharakteristik der sich anschließenden Elektronik-Baugruppen, kann eine Signalspannung bzw. ein digitale Zahl berechnet werden. Sie spiegelt die zu erwartenden Messgröße unter definierten Randbedingungen wieder.

3.2 Rückwärts-Rechnung

Der einfachste Ansatz für einen Auswertalgorithmus (Retrieval) ist dem DIAL-Prinzip zu verdanken, bei dem Systemkonstanten und somit systematische Fehler weitgehend eliminiert werden.

$$\rho(r) = \frac{1}{2\Delta\sigma(r)\Delta R} \ln \left(\frac{P_{off}(r_2)P_{on}(r_1)}{P_{on}(r_2)P_{off}(r_1)} \right)$$

Dieses Verfahren ist sehr einfach, setzt jedoch gewisse Kenntnisse über die Atmosphäre voraus (Absorptionsquerschnitte). Unter realen Bedingungen kann dieser Ansatz daher nur begrenzt zum Einsatz kommen.

Die Lösung des inversen Problems zur Bestimmung des Wasserdampfprofils unter Berücksichtigung diverser Fehlerquellen ist eine äußerst komplexe Aufgabe, für die es verschiedenste Verfahren gibt (z.B. POBERAJ, 2002). An dieser Stelle wird ein Ansatz vorgestellt – ein Verfahren zur Einbeziehungen der gestaffelten Wechselwirkungen.

Nach dem Beer Lambert Gesetz ist die Dichte der Wasserdampfmoleküle implizit in der Intensität des LIDAR-Signals $P_\nu(r)$ mit der Frequenz ν , reflektiert in der Höhe r , enthalten. Für die Berechnung der Anzahl der Moleküle (Retrieval) ergibt sich das Problem, dass kleine Störungen beliebig große Fehler erzeugen können. Da das System unterbestimmt ist, sucht man nach Möglichkeiten, mehr Informationen über das System zu verwerten. Eine solche Möglichkeit bietet die Einbeziehung der Wechselwirkung zwischen den einzelnen Schichten. Um die Wechselwirkungen zu beschreiben, wird ein Parameter ε eingefügt (STRATONOWICH, 1961). Für die Differenz zwischen benachbarten Schichten kann geschrieben werden

$$\frac{\partial}{\partial r} (\rho(r) - \rho(r_{Nachbarschicht})) = \varepsilon F(\rho(r), P_\nu(r), P_\nu(r - \Delta r), \xi(\nu, r))$$

Hierbei sind in ξ das Rauschen des Empfängers, die Fluktuationen in der Atmosphäre und andere Störungen zusammengefasst. Der Größe N beschreibt die Menge der Wasserdampfmoleküle und ist gegeben durch $N(\nu, r) = \sigma(\nu, r)\rho + \xi$, wobei ρ die Dichte der Wasserdampfmoleküle ist. Der Streuquerschnitt σ wird über das Voigtprofil berechnet. Da auch noch andere Streueffekte, mit N' bezeichnet, eine Rolle spielen, soll die verallgemeinerte Größe $z = z(N, N')$ benutzt werden. Damit ergibt sich für die Abgängigkeit von der Höhe r

$$\frac{\partial}{\partial r} (z(r_n) - z(r_{n-1})) = \varepsilon F(N, z(r_n), \xi(r)) \approx \varepsilon \left(\frac{1}{2\Delta\sigma(r_n)} \frac{1}{\Delta r} \left[\frac{P_{on}(r_n)}{P_{off}(r_n)} - \frac{P_{on}(r_{n-1})}{P_{off}(r_{n-1})} \right] \right)$$

Hierbei ist $P_{on}(r_n)$ der Messwert aus der Höhenschicht r_n , wenn die Frequenz des Lasersignals im Absorptionsbereich des Wasserdampfes liegt und $P_{off}(r_n)$, wenn die Frequenz außerhalb liegt. Somit hängt der Wert z von der Höhe r und der zu bestimmenden Anzahl der Wasserdampfmoleküle ab. Es wird nach z mit dem Hilfsparameter ε entwickelt, der nur zur Ordnung gleicher Anzahl von Wechselwirkungen dient und später gleich 1 gesetzt wird. Mit z wird die Dichte der Wasserdampfmoleküle, gegeben durch $(1/\Delta\sigma)P_{on}/P_{off}$, in Beziehung zu den Wechselwirkungen der Messwerte von den verschiedenen Höhenschichten gebracht. Hierbei soll angenommen werden, dass Messungen von oben in Richtung Erde vorgenommen werden. Die Ordnung der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Höhenschichten H_n wird über die Potenz von ε beschrieben und ergibt nach der Ableitung nach r

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} (z(r_n) - z(r_{n-1})) &= \varepsilon \frac{\partial}{\partial r} H_1(z_n, r) + \varepsilon^2 \frac{\partial}{\partial r} H_2(z_n, r) + \varepsilon^3 \frac{\partial}{\partial r} H_3(z_n, r) + \dots \\ &= \frac{\partial}{\partial r} H(z_n, r) \quad \text{wobei} \quad H = \sum \varepsilon^i H_i \end{aligned}$$

Der Wert z_n beschreibt das Profil in der Höhe r_n . Für einen größeren Abstand vom Empfänger können mehr Wechselwirkungen kombiniert werden. Entwickelt man z nach einer Taylorreihe um z_n , so erhält man:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} z(r) &= \varepsilon F(z_n, r, \xi(r)) + \varepsilon (z - z_n) \frac{\partial F(z, r, \xi(r))}{\partial r} \Bigg|_{z=z_n} \\ &+ \varepsilon \frac{(z - z_n)^2}{2} \frac{\partial^2 F(z, r, \xi(r))}{\partial r^2} \Bigg|_{z=z_n} + \varepsilon \frac{(z - z_n)^3}{3!} \frac{\partial^3 F(z, r, \xi(r))}{\partial r^3} \Bigg|_{z=z_n} \end{aligned}$$

Setzt man für $z - z_n$ den Ausdruck von Gleichung (3) ohne die Ableitung nach r ein, so erhält man

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} z(r) &= \varepsilon F(z_n, r, \xi) + \varepsilon \left[\varepsilon H_1(z_n, r) + \varepsilon^2 H_2(z_n, r) + \varepsilon^3 H_3(z_n, r) + \dots \right] \frac{\partial F(z, r, \xi)}{\partial r} \Bigg|_{z=z_n} \\ &+ \frac{\varepsilon}{2!} \left[\varepsilon H_1(z_n, r) + \varepsilon^2 H_2(z_n, r) + \varepsilon^3 H_3(z_n, r) + \dots \right]^2 \frac{\partial^2 F(z, r, \xi)}{\partial r^2} \Bigg|_{z=z_n} \\ &+ \frac{\varepsilon}{3!} \left[\varepsilon H_1(z_n, r) + \varepsilon^2 H_2(z_n, r) + \varepsilon^3 H_3(z_n, r) + \dots \right]^3 \frac{\partial^3 F(z, r, \xi)}{\partial r^3} \Bigg|_{z=z_n} + \dots \end{aligned}$$

Der Vergleich der Terme mit gleichen Potenzen von ε ergibt

$$H_1(z_n, r) = \int_0^r F(z, r', \xi(r')) dr'$$

Die Substitution von H_1 in den Beiträgen mit ε^2 ergibt

$$H_2(z_n, r_n) = \int_0^{r_n} dr' F'(z, r', \xi(r')) H_1(z_{sp}, r') = \int_0^{r_n} dr_1 F'(z, r_1, \xi(r_1)) \int_0^{r_{n-1}} F(z, r_2, \xi(r_2)) dr_2$$

Hierbei ist F' gegeben als $\left. \frac{\partial F(z, r, \xi)}{\partial r} \right|_{z=z_n}$ und wird beschrieben durch die Messwerte

$$\frac{1}{2\Delta\sigma(r_n)} \frac{\partial}{\partial r} \left[\left| \frac{P_{on}(z(r_{n+1})) - P_{on}(z(r_n))}{P_{off}(z(r_{n+1})) - P_{off}(z(r_n))} \right| - \left| \frac{P_{on}(z(r_n)) - P_{on}(z(r_{n-1}))}{P_{off}(z(r_n)) - P_{off}(z(r_{n-1}))} \right| \right]$$

Aus den mehrfachen Wechselwirkungen mit höheren Potenzen von ε ergibt sich:

$$H_3(z_n, r) = \int_0^{r_n} dr_1 (F'(z, r_1, \xi(r_1)) H_2(z_{sp}, r_1) + \frac{1}{2!} H_1^2(z_{sp}, r_1) F''(z, r_1)) =$$

$$\int_0^{r_n} dr_1 \left[F'(z, r_1) \int_0^{r_{n-1}} dr_2 F'(r_2) \int_0^{r_{n-2}} dr_3 F(r_3) + \frac{1}{2!} \int_0^{r_{n-1}} dr_2 F(r_2) \int_0^{r_{n-1}} dr_2 F(r_2) F''(r_1) \right]$$

Analog werden höhere Beiträge berechnet. Wegen der Taktimpulse für das Sendesignal und das Empfangssignal des Lasers sind die Werte digital und für die Ableitungen von F ergibt sich:

$$F'(r_k) = (F(r_k) - F(r_{k-1})) - (F(r_{k-2}) - F(r_{k-3})) \quad ; \quad F''(r_k) = (F(r_k) - F(r_{k-1})) - (F(r_{k-2}) - F(r_{k-3}))$$

Die Integrale werden durch Summen ersetzt, so dass gilt

$$\int_0^{r_k} dr_1 F(z, r_1, \xi(r_1)) \approx \sum_{l=1}^k |F(r_l) - F(r_{l-1})|$$

$$\int_0^{r_k} dr_1 F'(z, r_1, \xi(r_1)) \approx \sum_{l=3}^k \frac{|F(r_l) - F(r_{l-1})| - |F(r_{l-2}) - F(r_{l-3})|}{(\Delta r)^2} \Delta r$$

Mit den Beiträgen aus den Wechselwirkungen zwischen den Schichten kann eine Verbesserung der Genauigkeit für die Bestimmung der Wasserdampfkonzentration erreicht werden, da die Beiträge um die höherliegenden Schichten zwischen r_1 bis r_k einbezogen werden. Damit wird die Information, die in der Verkopplung der Messwerte steckt, ausgenutzt.

3.3 Optimierungsschleife

Den Ablauf einer typischen Parameter-Optimierung stellt Abb. 3 dar.

Anhand der Zielgrößen, die durch wissenschaftliche oder kommerzielle Nutzer gestellt werden, wird eine Systemspezifikation erarbeitet. Diese wiederum kann in einen Simulator eingehen, der die zu erwartenden Signale berechnet. Mit Hilfe von Retrieval-Algorithmen werden Datenprodukte erzeugt. Der zukünftige Systemnutzer muss anhand dieser Ergebnisse bewerten, ob das Gesamtsystem in der Lage ist, seinen Erwartungen gerecht zu werden. Im Bedarfsfall müssen Systemparameter, Aufnahmebedingungen und/oder Auswertalgorithmen angepasst werden.

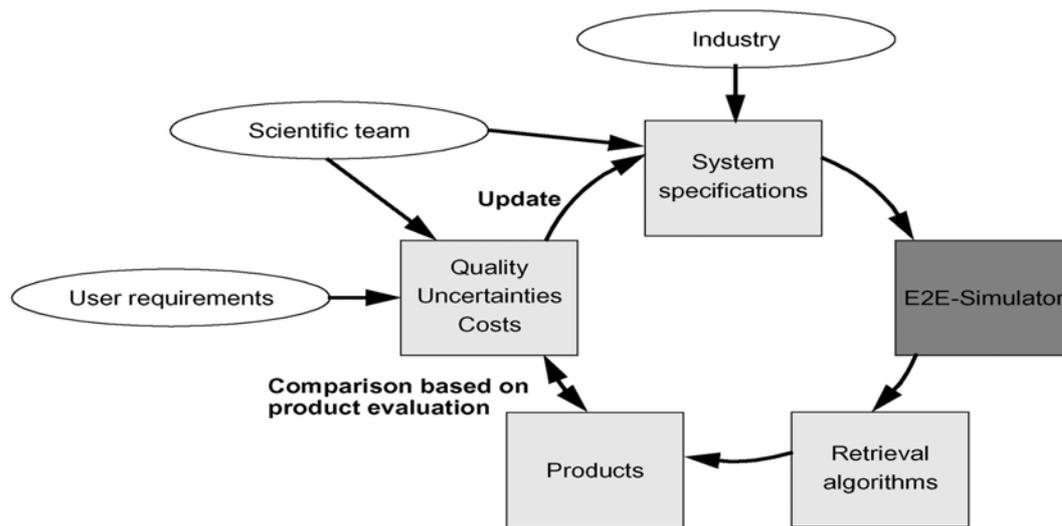


Abb. 3: Optimierungskreislauf

3.4 Beispiele

In diesem Abschnitt illustrieren zwei Beispiele die Anwendung eines komplexen End-To-End-Simulators. Diese Beispiele innerhalb dieses Artikels sollen lediglich die Herangehensweise beim Optimieren verdeutlichen, qualitative Aussagen sind daraus nicht abzuleiten.

Die erste zu bearbeitende Aufgabe bestand darin, unter Vorgabe bestimmter Systemparameter und eines Retrieval-Algorithmus herauszufinden, wie genau der Laser bezüglich seiner Soll-Wellenlänge stabilisiert werden muss bzw. wie groß ein Frequenz-Jitter sein darf, um bestimmte Fehler nicht zu überschreiten. Dazu wurden die Online-Wellenlängen $\nu_{1...3}$ mit gezielten Störungen beaufschlagt und die zu erwartenden Signale berechnet. Die Anwendung der Auswertalgorithmen ergab ein Wasserdampfprofil, das mit dem verglichen wurde, das in den Simulator als Eingangsgröße gegeben wurde. Abb. 4 zeigt die Ergebnisse. Um beispielsweise 20% Fehler nicht zu überschreiten, bedarf es einer Regelung, die den Laser auf etwa 0.01 cm^{-1} stabilisiert.

Die zweite Anwendung hatte zum Ziel, die für bestimmte Höhenschichten optimalen DIAL-Kombination zu bestimmen. Abb. 5 spiegelt sie Resultate wieder. Wiederum sei angemerkt, dass bestimmte Umwelt- und Systemparameter vorausgesetzt wurden, die Ergebnisse sind daher auch nur für diesen speziellen Input-Parametersatz relevant. Beispielsweise lässt sich aus dem Diagramm ableiten, dass für die unteren Höhenschichten die Kombination Laser₁/Laser₀ anbietet.

4 Ausblick

Der End-To-End-Simulator wurde in der Programmiersprache IDL implementiert und steht für DIAL-Anwendungen (wie z.B. WALES) zur Verfügung. Die Retrieval-Algorithmen sind in den nächsten Monaten anzupassen und zu verifizieren. Ein Hauptaugenmerk wird in der nächsten Zeit auf die Programmoptimierung und Verbesserung der Nutzerfreundlichkeit gelegt.

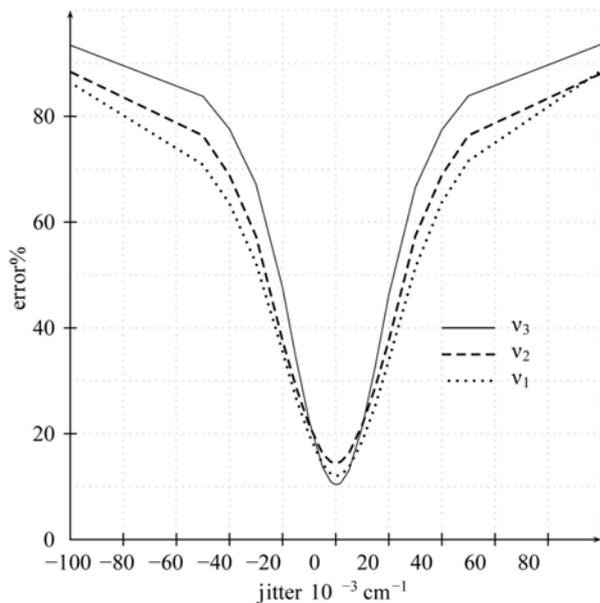


Abb. 4: Bewertung des Jitterns der Laserfrequenz

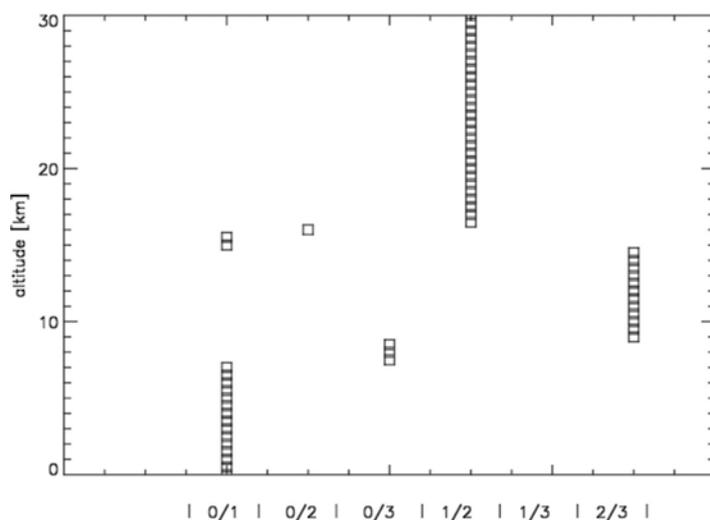


Abb. 5: Optimierung der Laser-Paare zur Bestimmung des Wasserdampfprofils in Abhängigkeit von der Höhe

5 Literaturverzeichnis

- POBERAJ, G., FIX A., ASSION A., WIRTH M., C. KIEMLE C., ELERT G.: Airborn all-solid-state DIAL for water Vapour measurements in the tropopause region: system description and assessment of accuracy, *Appl. Phys. B* 75, 165-172 (2002).
- STRATONOWICH R. L.: Ausgewählte Fragen der Theorie in der Radiotechnik, Verlag Sowjetisches Radio), 1961
- BÖRNER A., WIEST L., REULKE R., RICHTER R., KELLER P., SCHAEPMAN M., SCHLÄPFER D.: SENSOR: a tool for the simulation of hyperspectral remote sensing systems, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 55, pp. 299-312, 2001

Radiometrische Verarbeitung der ADS40 Bilddaten

ULRICH BEISL¹

Die ADS40 Kamera ist durch ihre radiometrisch stabile Konstruktion sowohl zur Aufnahme von Bilddaten für Kartographiezwecke als auch für fernerkundliche Zwecke geeignet. Es wird die radiometrische Kalibrierung der ADS40 Kamera beschrieben, die auf Strahldichte am Sensor kalibrierte Daten liefert. Weiter werden Datenprodukte erwähnt, die sich aus kalibrierten Daten berechnen lassen.

1 Einführung

Der Informationsgehalt von Luftbildern besteht nicht nur in den Umrissen, sondern auch in den Grau- und Farbwerten. Die Unterscheidbarkeit von Objekten steigt mit der Grauwert-/Farbtiefe und liegt beim menschlichen Auge bei etwa 7 bzw. $3 \cdot 7$ Bit. Hochauflösende optische Sensoren ermöglichen eine noch feinere Unterscheidung. Die Densitometrie wurde bereits beim klassischen Filmmaterial verwendet und wird heute beim digitalen Scannen angewandt.

Die Helligkeitsdynamik innerhalb eines klassischen Filmbildes liegt auch bei guten Verhältnissen unter 8 Bit. Durch Blende und Belichtungszeit kann die gesamte Dynamik der Kamera wesentlich gesteigert werden.

Für viele Anwendungen reicht eine relative Messung der Helligkeiten aus (z.B. Grauwerte von 0 bis 255). Für quantitative Analysen der Bildobjekte, sowie für bestimmte Korrekturverfahren (z. B. modellbasierte Atmosphärenkorrektur) ist die Kenntnis der absoluten Helligkeit erforderlich, welche durch die Radiometrie bestimmt wird. Leider lässt sich mit klassischen Filmmaterial bedingt durch den großen Belichtungsspielraum nur sehr ungenau auf die tatsächlichen Lichtintensitäten bei der Aufnahme schließen. Moderne digitale Kameras erlauben hier absolute Messungen über einen weitaus größeren Helligkeitsbereich innerhalb eines Bildes (z.B. CCD-Kameras wie die ADS40 bis 12 Bit). Eine höhere Helligkeitsdynamik und damit ein besserer Kontrast (normalized relative edge response RER) kann auch eine geringere räumliche Auflösung kompensieren, wie eine aus der militärischen Identifizierung kommende Formel nahelegt (General Image Quality Equation, GIQE, LEACHTENAUER ET AL., 1997).

Für digitale Satellitendaten wurde schon von Beginn an auf eine radiometrische Kalibrierung Wert gelegt, weil für die geometrisch zumeist mäßig bis gering auflösenden Sensoren die radiometrische Information mindestens ebenso wichtig ist wie die geometrische. Die atmosphärische Korrektur ist für Satellitensensoren meist einfacher, weil zwar der atmosphärische Weg länger, aber konstant ist und der Blickwinkel des Sensors meist nur gering ist.

Für Flugzeugsensoren ist die Hauptanwendung nach wie vor der Vermessungs- und Kartierungsbereich, der eher geringe Anforderungen an die radiometrische Dynamik stellt. Hingegen wird viel Wert auf eine ausgeglichene Bildhelligkeit gelegt. Im Gegensatz dazu wird bei den immer wichtiger werdenden thematischen Auswertungen im Fernerkundungsbereich auf präzise absolute Radiometrie Wert gelegt. Hier machen sich atmosphärische und topographische Beleuchtungseffekte nicht nur störend bemerkbar, sondern behindern eine quantitative Analyse.

¹ Dr. sc. nat. Ulrich Beisl, Systemingenieur Leica Geosystems GIS & Mapping GmbH, Heinrich-Wild-Strasse, CH-9435 Heerbrugg, e-mail: ulrich.beisl@gis.leica-geosystems.com

Bedingt durch die stabile radiometrische Konstruktion und die Auslegung als Multispektralkamera ist die ADS40 Kamera als Fernerkundungskamera geeignet. Im folgenden soll das radiometrische Konzept, sowie der Stand der Umsetzung gezeigt werden.

2 Radiometrische Größen in der Photogrammetrie und Fernerkundung

Die Daten einer Digitalkamera liegen zunächst in ganzen Zahlen, sog. Grauwerten, vor. Die Radiometrie benutzt eine Reihe von physikalischen Größen, die mit den photometrischen Größen für die visuelle Lichtmesstechnik korrespondieren (Tab. 1).

Tab. 1 Strahlungs- und Photometrische Größen

Strahlungsgröße		Einheit	Photometrische Größe		Einheit
W	Strahlungsenergie	radiant energy	J	Lichtmenge	luminous energy lm s
Φ	Strahlungsfluss	radiant flux	W	Lichtstrom	luminous flux lm
H	Bestrahlung	radiant exposure	J/m ²	Belichtung	exposure lx s
E	Bestrahlungsstärke, spezifische Ausstrahlung	irradiance, radiant exitance	W/m ²	Beleuchtungsstärke, Lichtausstrahlung	illuminance, luminous exitance lx = lm/m ²
I	Strahlstärke	radiant intensity	W/sr	Lichtstärke	luminous intensity cd
L	Strahldichte	radiance	W/m ² /sr	Leuchtdichte	luminance cd/m ²

Während photometrische Größen per Definition auf den spektralen Hellempfindlichkeitsgrad des Auges bezogen werden (z.B. CIE1924 – Kurve), beziehen sich die radiometrischen Größen zunächst integral auf den gesamten betrachteten Spektralbereich.

Will man jedoch die spektrale Abhängigkeit der Größe X untersuchen, dann benutzt man spektrale Dichten $X(\lambda)$, z.B. spektrale Strahldichte $[W/m^2/sr/nm]$.

Die gemittelte Größe (band-averaged) berechnet sich dann mittels der spektralen Responsefunktion $R(\lambda)$ zu

$$X = \frac{\int X(\lambda)R(\lambda) d\lambda}{\int R(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

Ein Sensor misst die Bestrahlungsstärke innerhalb eines bestimmten Blickwinkels. Daher wird im folgenden die Strahldichte als physikalische Messgröße verwendet. Die ADS40 Kamera besitzt vier nicht überlappende Spektralkanäle im sichtbaren und nahen Infrarot, sowie panchromatische Stereokanäle (siehe Tab. 2).

Die spektrale Breite des blauen Kanals ist etwas größer als jene der übrigen Farbkanäle, um dieselbe Empfindlichkeit zu erreichen. Um jedoch die unterschiedliche Kanalbreite für spektrale Untersuchungen zu berücksichtigen, werden im folgenden für die Kanäle gemittelte

spektrale Strahldichten [$\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$] nach (1) und nicht die integrale Strahldichte [$\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$] berechnet.

Tab. 2 Spektralkanäle der ADS40 (Halbwertsbreite, FWHM)

Band	Untere Wellenlänge [nm]	Obere Wellenlänge [nm]
Blau	430	490
Grün	535	585
Rot	610	660
NIR1 (Option)	705	755
NIR2	835	885
Panchromatisch	465	680

Die geometrische Lage der Kanäle variiert je nach Konfiguration, ist aber fest für jede Kamera. Die Lage der RGB-Kanäle ist im Strahlengang durch Verwendung eines Strahlteilers identisch.

3 Kalibrierung der ADS40 Kamera

3.1 Kalibriereinrichtung

Als Kalibrierlichtquelle findet eine Ulbrichtkugel mit 0,9 m Durchmesser und einer WRC680-Beschichtung der Firma Labsphere Verwendung. Beleuchtet wird die Quelle von 3 6“ Satellitenkugeln, die von je einer 150 W Halogenlampe beleuchtet werden (siehe Abb. 1).



Abb. 1: Ulbrichtkugel zur Kalibrierung.

Die Ulbrichtkugel ist mittels einer kalibrierten Lampe auf Strahldichte kalibriert und ist innerhalb des Blickwinkels der Kamera von $\pm 32^\circ$ bis auf $\pm 4\%$ homogen.

Derzeit muss für die Kalibrierung der Farbkanäle eine Integrationszeit von 20 ms gewählt werden, was um den Faktor 4 bis 16 über den üblichen Integrationszeiten für Luftbildaufnahmen liegt (siehe Abb. 2).

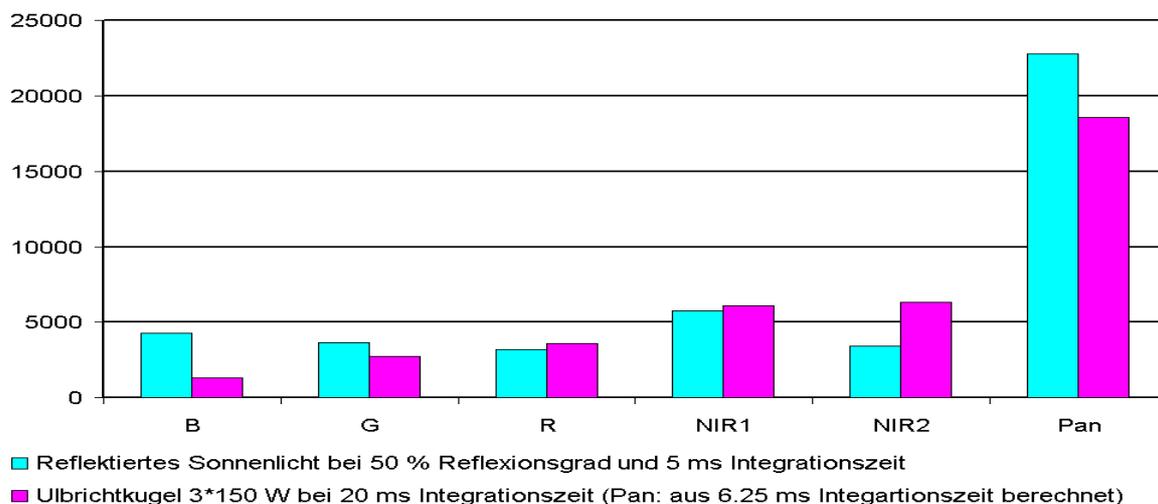


Abb. 2: Vergleich der Grauwerte einer Flugszene und einer Kalibrierung mit der aktuellen Ulbrichtkugel.

Durch Verwendung von 250 W Lampen und einer Neubeschichtung der Kugel wird eine Verdopplung der Strahldichte angestrebt. Die Strahldichte im blauen Spektralbereich wird künftig durch den Einsatz von blauen Hochleistungs-Leuchtdioden zusätzlich um den Faktor drei vergrößert. Durch geeignete Wahl der Leuchtdioden kommt deren Spektrum vollständig innerhalb des blauen Kanals zu liegen und erzeugt in der Kamera einen mit der Sonneneinstrahlung vergleichbaren Signalpegel (siehe Abb. 3).

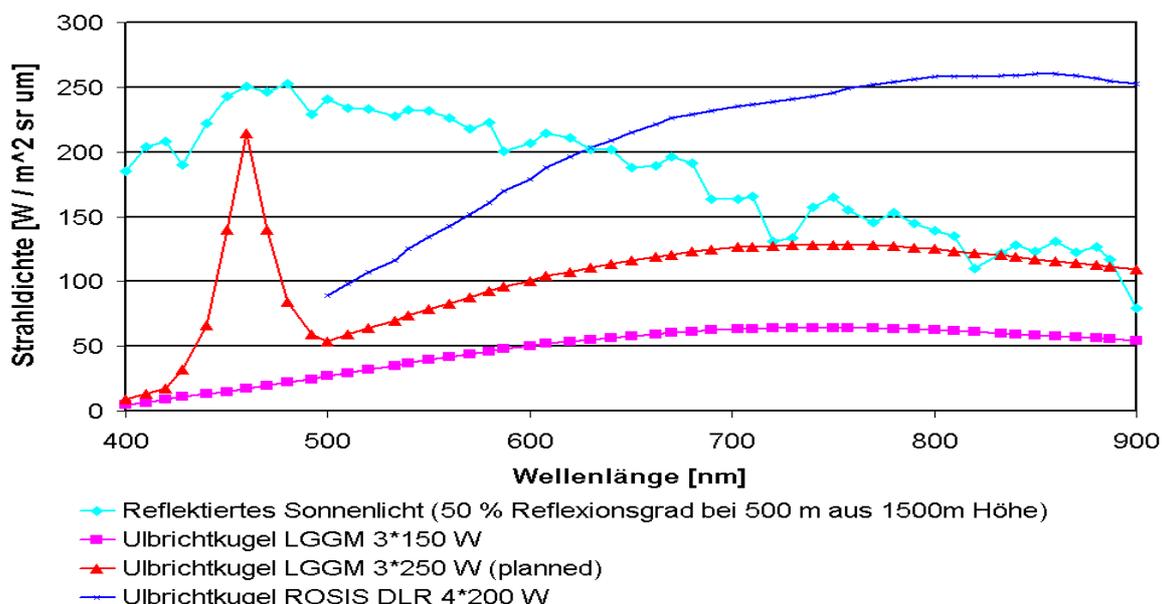


Abb. 3: Vergleich der Strahldichten einer Flugszene mit der Strahldichte verschiedener Ulbrichtkugeln.

Durch Anschaffung einer lokalen auf Strahldichte kalibrierten Lampe wird versucht, die absolute Kalibrierung der Kugel auf 5 % genau durchzuführen.

3.2 Kalibrierverfahren

3.2.1 Radiometrisches Modell

Das einfachste Modell eines Sensors, das bei der ADS40 in sehr guter Näherung zutrifft, ist ein lineares Modell. Die Grauwerte DN (digital numbers) pro Kanal hängen ab vom Kalibrationsfaktor C_1 und einem Offset C_0 . Dabei ist L die gemittelte spektrale Strahldichte pro Kanal.

$$L = C_1 DN + C_0 \quad (2)$$

Der Offset C_0 wird in der Dunkelstromkorrektur (siehe Abschnitt 3.2.2) auf 0 korrigiert. Da die Abhängigkeit von der Integrationszeit t linear ist (vgl. Abschnitt 3.3), hat man mit der Definition eines spezifischen Kalibrationsfaktors c_1 folgende Abhängigkeit

$$c_1 \equiv C_1 \cdot t \quad (3)$$

$$L = \frac{c_1 \cdot DN}{t} \quad (4)$$

Der spezifische Kalibrationsfaktor ist eine Kamerakonstante mit den Einheiten [$\text{W s m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1} \text{DN}^{-1}$].

3.2.2 Systemkorrektur

Die Systemkorrektur dient dazu, Kameraartefakte auszugleichen und ein dem Kameramodell gemäÙes Signal zu liefern.

Dunkelstromkorrektur (Dark Signal Non-Uniformity, DSNU)

Die CCD-Zeilen liefern aufbaubedingt auch ohne einfallendes Licht ein Signal, welches zudem von der Temperatur und in geringem Masse auch von der Pixelposition abhängt. Der Temperatureinfluss wird durch eine geregelte Peltierkühlung auf 20° C Fokalebene­temperatur ausgeschaltet. Das pixelabhängige Dunkelsignal wird dadurch beseitigt, dass eine Dunkel­messung durchgeführt, dieses Signal dauerhaft im Kamerakopf gespeichert und bereits von den Rohdaten abgezogen wird.

Hellfeldmessung (Photo Response Non-Uniformity, PRNU)

Bedingt durch Fertigungstoleranzen variiert die Signalverstärkung der einzelnen CCD-Pixel über die Zeile. Zudem verursacht die Optik einen Intensitätsabfall des einfallenden Lichts zum Rand hin. Das von der kalibrierten Ulbrichtkugel in der CCD-Zeile erzeugte Signal wird gemessen. Das Verhältnis von Maximalwert zum jeweiligen Pixelwert wird als Korrekturfaktor für jedes Pixel errechnet, dauerhaft im Kamerakopf gespeichert und bereits auf die Rohdaten multipliziert. Abschließend wird eine erneute Messung des Hellsignals durchgeführt und der über die Zeile konstante Wert für die Berechnung des Kalibrationsfaktors c_1 verwendet.

3.2.3 Spektrale Kalibrierung

Im Strahlengang der einzelnen ADS40-Kanäle befinden sich eine Reihe von Bauteilen, die die spektrale Empfindlichkeit beeinflussen. Zunächst besitzt die Optik einen kurzwelligen cutoff bei 400 nm. Anschließend wird das Signal durch den Strahlteiler bereits entsprechend der Spektralkanäle aufgeteilt. Die endgültige Begrenzung der spektralen Durchlasskurven wird durch hochwertige Interferenzfarbfilter hergestellt. Schließlich besitzt die CCD-Zeile

eine spektrale Empfindlichkeit, die bei 730 nm ihr Maximum hat und bei 400 nm und 900 nm auf die Hälfte abfällt.

Aus diesen Daten lässt sich der relative spektrale Empfindlichkeitsverlauf (spectral response function) des gesamten Systems berechnen. Unter Verwendung der Strahldichtekalibration der Ulbrichtkugel und dem gemessenen Grauwert ergibt sich nach (4) die absolute spektrale Empfindlichkeit als Kehrwert des spezifischen spektralen Kalibrationsfaktors (siehe Abb. 4). Eine Labormessung zur Verifikation ist im Gange.

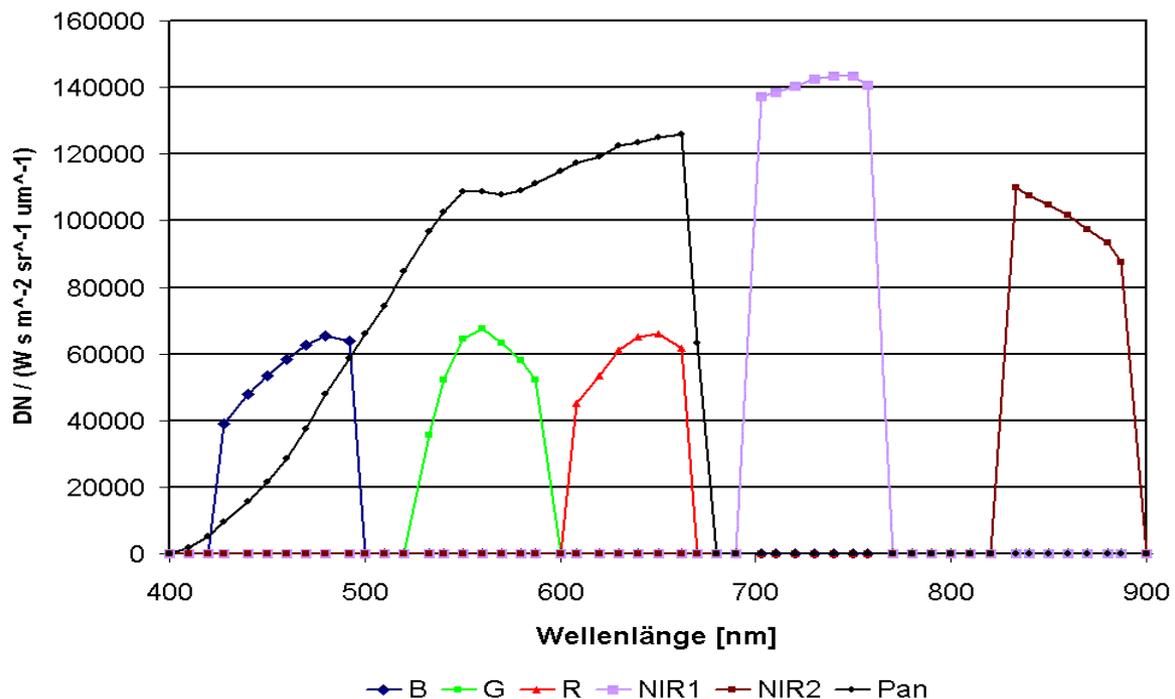


Abb. 4: Spektraler Empfindlichkeitsverlauf der ADS40-Kanäle (berechnet). Die Absolutwerte gelten für den Sensorkopf No. 30005.

3.2.4 Relative radiometrische Kalibrierung

Mittels der bei der PRNU ermittelten Grauwerte pro Zeile kann eine relative Kalibrierung der Kanäle zueinander gemacht werden, dergestalt, dass für ein spektral gleichmäßig reflektierendes Target bei natürlicher Beleuchtung dasselbe Signal in allen Spektralkanälen gemessen wird.

3.2.5 Absolute Radiometrische Kalibrierung

Durch kanalweise Mittelung der absoluten spektralen Empfindlichkeit und Bildung des Kehrwerts erhält man den spektralen Kalibrationsfaktor c_1 [$W s m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1} DN^{-1}$].

3.3 Linearität

Laut Herstellerangaben ist die verwendete CCD-Zeile innerhalb der Integrationszeiten von 1.25 ms bis 45 ms linear auf 0.8 %.

Nach Herstellerangaben ist die Abweichung von der radiometrischen Linearität kleiner als 5 %. Messungen dazu sind in Vorbereitung, aber aller Erfahrung nach sollte die Abweichung von der Linearität im Bereich bis 6000 DN kleiner als 1 % sein.

3.4 Rauschverhalten

Das signalunabhängige Rauschen kann am einfachsten bei der Dunkelstrommessung als Standardabweichung $\sigma_{DN(L=0)}$ über ausreichend viele Messungen bestimmt werden (STROBL, 2000, S. 70). Multipliziert mit dem Kalibrationskoeffizienten c_1 erhält man die rauschäquivalente Strahldichte (noise equivalent radiance, NER).

$$NER = c_1 \sigma_{DN(L=0)} \quad (5)$$

Die Standardabweichung $\sigma_{DN(L \neq 0)}$ während der Hellfeldmessung ergibt dann die rauschäquivalente Strahldichtedifferenz (noise equivalent delta radiance, NE Δ R).

$$NE\Delta R(L) = c_1 \sigma_{DN(L \neq 0)} \quad (6)$$

Für die ADS40 beträgt das Rauschen unter ± 5 DN.

Anschaulicher, aber abhängig von den Lichtverhältnissen ist die Angabe des Signal/Rausch-Verhältnisses (SNR).

$$SNR(L) = \frac{L}{NE\Delta R} = \frac{\overline{DN(L)}}{\sigma_{DN(L)}} \quad (7)$$

Bei einer typischen minimalen/mittleren/maximalen Datentiefe von 8/10/12 bit ergibt sich ein SNR von 50/200/800.

4 Datenprodukte

Das Standarddatenprodukt einer Befliegung sind zuerst systemkorrigierte Rohdaten.

Für photogrammetrische Anwendungen wird derzeit in der Prozessierungssoftware GPro keine weitere radiometrische Verarbeitung durchgeführt. Folgende Schritte sind jedoch möglich:

- Die Korrektur des Blaustichs, sowie von blickwinkelabhängigen Effekten (BRDF) ist über den Image Equalizer von Leica Geosystems möglich.
- Mittels der auf Anfrage erhältlichen Kalibrationsfaktoren können relativ kalibrierte Daten erzeugt werden, die von Sensor zu Sensor vergleichbare Ergebnisse liefern. Damit ist eine bessere Vergleichbarkeit in Projekten mit mehreren Sensoren gewährleistet und der Farbgleich beim Mosaikieren kann standardisiert werden.
- Aus Gründen der fernerkundlichen Auswertung besitzen die ADS40-Kanäle getrennte Spektralbereiche für rot, grün und blau, im Gegensatz zu den stark überlappenden spektralen Empfindlichkeitskurven der Farbrezeptoren im menschlichen Auge. Durch eine Transformation im Farbraum lassen sich jedoch die ADS40-Daten auf die Augenempfindlichkeit umrechnen. Damit können farbrichtige RGB-Bilder erzeugt werden.

Die für die Fernerkundung interessierende Größe ist jedoch nicht die am Sensor gemessene Strahldichte, sondern der am Boden vorhandene Reflexionsgrad, d.h. das Verhältnis von reflektierter Strahldichte des Bodens zu einfallender Bestrahlungsstärke. Dazu müssen zunächst die Effekte nach der Reflexion am Boden bis zum Sensor abgezogen werden um die Strahldichte am Boden zu erhalten (Atmosphärenkorrektur). Anschließend muss die Sonnenstrahlung simuliert werden, um die Bestrahlungsstärke zu erhalten. Dieser Reflexionsgrad ist aus physikalischen Gründen winkelabhängig (bidirektionale Reflexion) und sollte auf einen bestimmten Blickwinkel korrigiert werden (sog. BRDF-Korrektur).

Für fernerkundliche Zwecke sind folgende Schritte möglich:

- Auf Anfrage können derzeit die Kalibrationsfaktoren der Kameras erhalten werden, um absolut radiometrisch kalibrierte Daten (at-sensor radiance) zu erhalten.
- Atmosphärisch korrigierte und auf Reflektanz kalibrierte Daten können derzeit mit den Paketen von ERDAS IMAGINE erzeugt werden. Besonders sei auf das Zusatzpaket ATCOR von R. Richter hingewiesen. Für eine operationelle Korrektur bei guten Wetterbedingungen wurde ein Demonstrator vom IRS, Uni Stuttgart entwickelt.
- Eine weitgehende Korrektur von BRDF-Effekten kann mittels operationeller Verfahren erfolgen (BEISL & WOODHOUSE, 2004).

5 Literaturverzeichnis

BEISL, U., WOODHOUSE, N., 2004: Correction of atmospheric and bidirectional effects in multispectral ADS40 images for mapping purposes. Proc. XXth Congress of the ISPRS, Istanbul, Türkei.

LEACHTENAUER, J. C., MALILA, W., IRVINE, J., COLBURN, L., UND SALVAGGIO, N., 1997: General image-quality equation: GIQE - Applied Optics, **36**(32): S. 8322-8328.

STROBL, P., 2000: Entwicklung von Verfahren zur Datenaufbereitung und Kalibrierung eines abbildenden Spektrometers am Beispiel des DAIS 7915. Dissertation Uni Potsdam, 142 S., Scientific Technical Report STR00/12 GeoForschungsZentrum Potsdam, Potsdam.

Geometrische Kalibration von CCD Kameras mittels Beugungsbildern

MARTIN SCHEELE¹, HERBERT JAHN², REINHARD SCHUSTER³

Zusammenfassung: Die geometrische Kalibration von Kameras erfordert entweder ein ausgewiesenes Testfeld den Abbildungsbedingungen entsprechender Größe oder eine aufwändige Apparatur zur Einzelpixel-Vermessung. Mittels Fraunhoferscher Beugung, unter Verwendung einer kohärenten Lichtquelle, kann auf neuartige Weise die geometrische Kalibration von CCD Kameras vorgenommen werden. Berechnete Symmetrien von Beugungsbildern erlauben in einem ersten Schritt die Ausrichtung der optischen Achse in Relation zu einem Laserstrahl. Mittels eines diffraktiven optischen Elements werden in der Bildebene der Kamera hochgenaue Muster (Bilder) erzeugt. Die Diskrepanz zwischen den idealen Orten der Beugungsmuster und den mit der Kamera gemessenen erlaubt es, die entsprechende Kalibration durchzuführen. Der Vorteil dieses neuen Verfahrens liegt in der Kompaktheit der Messanordnung.

1 Einleitung

Bisherige Verfahren zur geometrischen Kalibration von CCD-Kameras lassen sich prinzipiell wie folgt unterscheiden. Zum Einen werden Testfelder mit vermessenen Punkten für die Kalibration der Kameras genutzt. Die im Bildfeld gemessene Lage der Punkte wird mit der einer idealen Abbildung verglichen. Mit entsprechenden mathematischen Verfahren (z.B. Luhmann, Kraus) wird aus dieser Abweichung der Kalibrationsfile oder eine Korrekturvorschrift für die vermessene Kamera abgeleitet. Zum Anderen werden Verfahren der Einzelpixelbeleuchtung für die Kalibration von CCD – Kameras genutzt. Durch hochgenaue Drehung der Kamera in einem aufgeweiteten Kollimatorstrahl oder durch Beleuchtung der feststehenden Kamera aus verschiedenen Richtungen in einem Goniometer werden einzelne Pixel des Bildsensors belichtet. Die Pixelnummer des Sensors und die gemessenen Winkel der Drehung liefern die Grundlage für die geometrische Kalibration (siehe Schuster/Braun-ecker).

Für den Fall einer auf Unendlich fokussierten Kamera bedarf es im ersten Verfahren Testfeld-ausmaßen von mehreren Metern in hinreichender Entfernung von der Kamera. Die zweite Möglichkeit der Kalibration setzt eine aufwändige Messtechnik voraus und ist durch die Einzelpixelbeleuchtung sehr zeitintensiv. Das in dieser Arbeit vorgeschlagene Kalibrationsprinzip würde diese Nachteile umgehen.

2 Versuchsaufbau

Der experimentelle Aufbau ist schematisch in der Abbildung (1) dargestellt. Der Lichtstrahl eines He-Ne-Lasers (633 nm) wird entsprechend der Apertur der zu kalibrierenden Kamera

¹Dr. Martin Scheele, ²Prof. Herbert Jahn, ³Dr. Reinhard Schuster, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Einrichtung optische Informationssysteme, Rutherfordstraße 2, D- 12489 Berlin, e-mail: martin.scheele@dlr.de; herbert.jahn@dlr.de; reinhard.schuster@dlr.de

aufgeweitet und mit einer Kollimatoroptik parallel ausgerichtet. Unmittelbar vor der Eintrittsoptik der Kamera wird das beugende Element angeordnet. Die mit der Kamera aufge-

nommenen Bilder werden in einem PC gespeichert, der gleichzeitig die Darstellung der Aufnahmen und die Auswertung übernimmt. Ein Bild des fertigen Demonstratoraufbaus mit einer zu kalibrierenden Digitalkamera (Olympus E1) ist in der folgenden Abbildung (2) zu sehen.

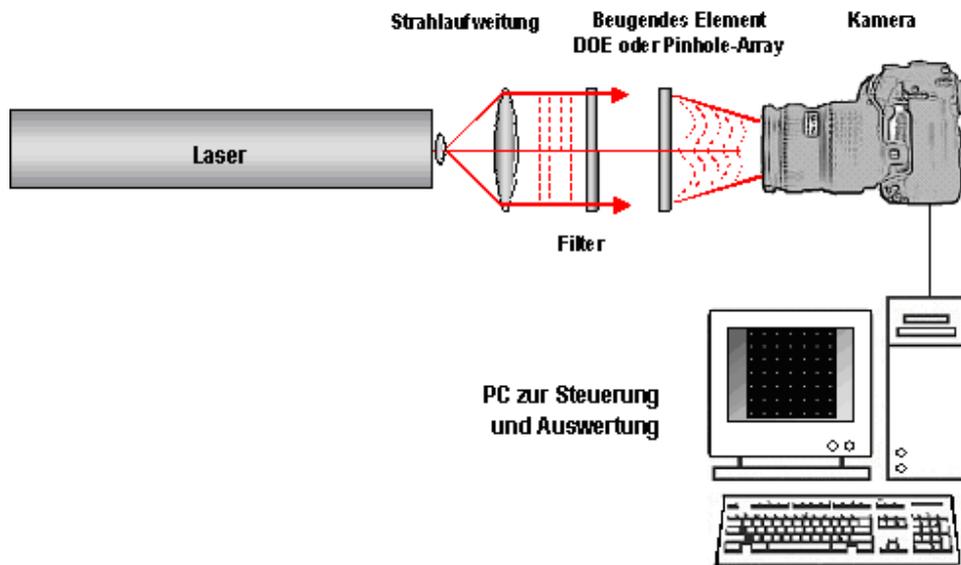


Abb.1: Schematischer Versuchsaufbau



Abb.2: Demonstratoraufbau

3 Bestimmung der optischen Achse

Der Durchstoßpunkt der optischen Achse durch die Bild- bzw. Sensorebene ist der Koordinatenursprung (Hauptpunkt) für alle Bildkoordinatensysteme. Dieser wird üblicherweise aus mehreren Aufnahmen eines Testfeldes ermittelt, indem die Kamera um ihre Achse gedreht wird. Für die hier vorgestellte Methode ist es vorteilhaft, diesen Durchstoßpunkt direkt zu bestimmen. Dieses Ziel ist erreicht, wenn es gelingt, die optische Achse des Kalibrationsaufbaus mit der der Kamera in Deckung zu bringen. Dies kann durch Einsatz beugender Strukturen, deren Beugungsbilder berechnet werden können, erreicht werden. Die Beugung an einfachen Objekten diene als Ausgangspunkt für die Bestimmung des Haupt-

punktes. Damit die Berechnungen auf PC's in vernünftigen Zeiträumen möglich sind, wurden Lochblenden, die in Abb.3 in der Gegenstandsweite $-g$ angeordnet sind, als beugende Objekte gewählt. Unter den Voraussetzungen einer kohärenten Lichtquelle, der Fresnelschen und paraxialen Näherung, wird ausgehend vom Kirchhoffschen Beugungsintegral in der Bildebene (x,y) die Intensitätsverteilung $|U_\lambda|^2$ des an den beugenden Löchern der (x',y') Gegenstandsebene und der anschließenden Beugung an der dünnen endlichen Linse mit dem Radius R der (ξ,η) Ebene, berechnet. Hierbei ist b die Bildweite und U'_λ die einfallende Lichtwelle.

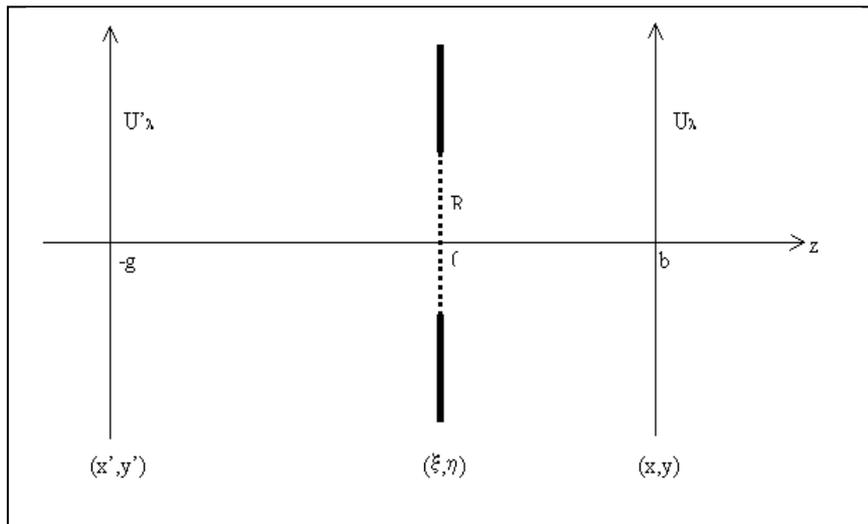


Abb.3: Anordnung zur Berechnung von Beugungsbildern

Unter Verwendung der Parameter der untersuchten Kamera, Brennweite $f = 14$ mm, Gegenstandsweite $g = 37,8$ mm und einer Apertur $R = 2,5$ mm wurde die Intensitätsverteilung des gebeugten Laserlichts (633nm) berechnet.

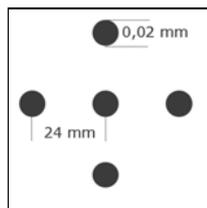


Abb. 4: Lochblende



Abb. 5: Berechnetes Beugungsbild der Lochblende

Die Verteilung der beugenden Löcher in der Lochblende zeigt die Abbildung (4). Die Kamera muss so justiert werden, dass die Symmetrie im gemessenen Beugungsbild die beste Übereinstimmung mit dem berechneten Beugungsbild, Abbildung (5), aufweist.

4 Versuchsdurchführung

Als beugendes Element für die Kamerakalibration wurde ein diffraktives optisches Element benutzt. Diffraktive optische Elemente (DOE) sind mittels Elektronenstrahl-Lithographie

hergestellte 2D-Hologramme. Die dabei verwendete Strukturgröße beträgt ca. 1 μm . Die Abmaße des im Versuchsaufbau benutzten DOE der Firma Holoeye beträgt 4 cm x 4 cm und weist 7 x 7 Beugungspunkte der 1. Ordnung auf. Die Beugungswinkel der einzelnen Beugungspunkte sind auf eine Bogensekunde genau bekannt. Die Vorteile eines DOE gegenüber normalen beugenden Strukturen, wie Gitter oder beugenden kreisförmigen Öffnungen, bestehen in der Translationsinvarianz der Beugung, d.h. der Ort des DOE vor der Optik der Kamera hat keinen Einfluss auf das Beugungsbild. Der Intensitätsabfall der Beugungsordnungen ist um Größenordnungen geringer als bei einer vergleichsweise konventionellen Lochmatrix, die z. B. durch Laserbeschuss hergestellt wurde. Darüber hinaus ist das Beugungsbild mathematisch vergleichsweise einfach beschreibbar.

Mit dem Demonstratoraufbau (Abbildung (2)) wurde die Kalibrationsmethode mit verschiedenen Kameras aus dem wissenschaftlich technischen und kommerziellen Bereich erprobt. Besonderes Interesse besteht an der Kalibrierung kommerzieller Digitalkameras von der einfachen kompakten Ausführung bis hin zur hochwertigen digitalen Spiegelreflexkamera.

Als Beispiel soll hier die Messung mit der digitalen Spiegelreflexkamera Olympus E1 beschrieben werden. Die Ausrichtung der Kamera im Versuchsaufbau erfolgte mit der im Kapitel (3) beschriebenen Methode, bei der die Symmetrie eines Punkt-Beugungsbildes ausgewertet wird.

In der Abbildung (6) ist im linken Bild das theoretische Beugungsbild des Punktmusters bei idealer Ausrichtung dargestellt, das mittlere Bild zeigt das experimentelle Ergebnis bei schlechter und das rechte Bild bei guter Justage der optischen Achse.

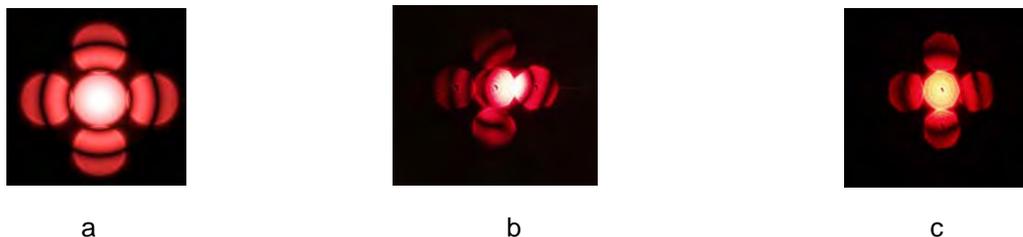


Abb. 6: Ausrichtung der Kamera (a: theoretisches Beugungsbild, b: schlechte, c: gute Justierung)

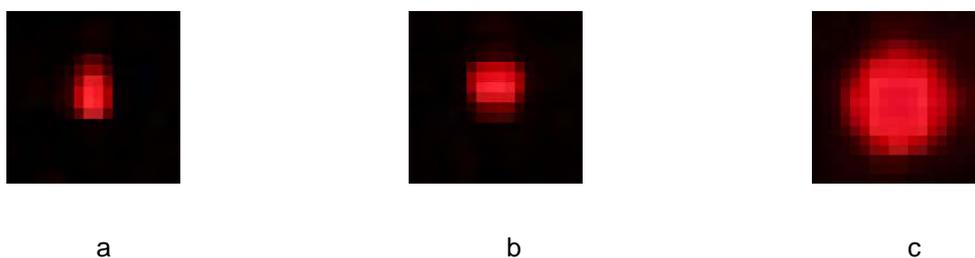


Abb. 7: Fokussierung der Kamera (a: Einstellung unendlich, b: 4m, c: 1m)

Während der Messungen zeigte es sich, dass die Anordnung auch sehr effektiv für die Fokussierung und optimale Justage des Sensors verwendet werden kann. Da mit einer einzigen Aufnahme Messpunkte über dem gesamten Bildbereich entstehen, gibt die Form und Ausdehnung dieser abgebildeten Punkte direkte Aussagen über die optimale Fokussierung und Sensorlage.

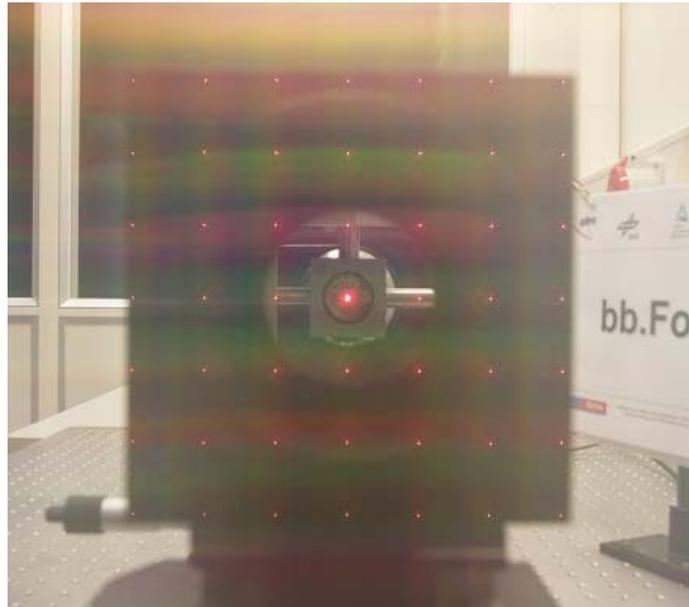


Abb. 8: Kalibrationsaufnahme (Olympus E1) bei heller Laborumgebung

In Abbildung (8) ist eine Kalibrationsaufnahme der Kamera Olympus E1 nach optimaler Ausrichtung der optischen Achsen und Fokussierung dargestellt. Die Aufnahme wurde im nicht abgedunkelten Labor gemacht, um zu demonstrieren, dass die auf unendlich fokussierte Kamera im unscharfen Abbild der Umgebung gestochen scharfe Messpunkte für die Kalibration erzeugt.

5 Auswertung

Es wurden mehrere Kameras mittels der Anordnung (2) kalibriert. Die Ergebnisse wiesen keine signifikanten Unterschiede auf. Die Orte der Beugungspunkte wurden bestimmt und die Differenz zu denen einer idealen Abbildung ermittelt. Ein Polynomialfit 3. Ordnung lieferte die Transformation vom Originalbild in das kalibrierte Bild. Ein typisches Ergebnis ist das für die Kamera Olympus E1. Der mittlere absolute Fehler betrug in horizontaler Richtung 0,2 Pixel und in vertikaler Richtung 0,5 Pixel. Die Standardabweichung hat einen Wert von 0,54 Pixel. Die Ergebnisse waren von der Blendenöffnung unabhängig. Belichtungszeit und Blende mussten allerdings so gewählt werden, dass zum Einen die Intensität zur Detektion der Beugungspunkte ausreicht und zum Anderen eine Überbelichtung vermieden wird, die die Ortsbestimmung verschlechtern würde. Eine chromatische Querabberation konnte bei der untersuchten Kamera nicht festgestellt werden. Somit ist die erfolgte Kalibration nicht von der Wellenlänge des benutzten Lasers abhängig.

6 Zusammenfassung

Es konnte der Nachweis erbracht werden, dass mittels DOEs CCD-Kameras geometrisch kalibriert werden können. Damit ist die Möglichkeit gegeben, Kalibrationsvorrichtungen für CCD – Kameras in Baulängen von ca. 0,5 m herzustellen. Die Ausrichtung der optischen Achse zum ungebeugten Laserstrahl und damit die Bestimmung des Bildhauptpunktes

erfolgte durch Beugung an einem Punktmuster, dessen ideale Geometrie theoretisch bestimmt wurde. Der Nachweis zur Kalibration von CCD – Zeilenkameras wurde noch nicht erbracht. Für diesen Fall müssen die Beugungsbilder eine solche Asymmetrie aufweisen, die eine Identifikation der CCD-Pixel in der Bildebene erlaubt.

Danksagung

Die hier vorgestellten Arbeiten entstanden im Rahmen des Projektes bbFoKal. 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 den Firmen Holoeye, Astro und Feinwerktechnik Adlershof und Optikkomponenten und Kristalle. Zu besonderen Dank sind die Autoren Frau Davina Jolly und Herrn Dr. Anko Börner verpflichtet, die entscheidenden Anteil an der numerischen Auswertung der Beugungsbilder hatten.

Literatur

- ALBERTZ, J., KREILING W., (1989): Photogrammetrisches Taschenbuch.- 4.Aufl., Wichmann Verlag, Karlsruhe
- LUHMANN, TH., (2000): Nahbereichsphotogrammetrie.- 1. Aufl., Wichmann Verlag Heidelberg
- SCHUSTER, R., BRAUNECKER, B., (2000): Calibration of the LH Systems ADS40 Airborne Digital Sensor, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, Part B1, Amsterdam 2000, S. 288-294

APEX: Current Status of the Airborne Dispersive Pushbroom Imaging Spectrometer

Jens Nieke^{#a}, Klaus I. Itten^a, Johannes W. Kaiser^a, Daniel Schläpfer^a, Jason Brazile^a, Walter Debruy^b, Koen Meuleman^b, Pieter Kempeneers^b, Andreas Neukom^c, Hans Feusi^c, Peter Adolph^c, Renzo Moser^c, Thomas Schilliger^c, Marie van Quickelberghe^d, John Alder^d, Dominique Mollet^d, Lieve De Vos^d, Peter Kohler^e, Markus Meng^e, Jens Piesbergen^e, Peter Strobl^f, Michael E. Schaepman^g, José Gavira^h, Gerd Ulbrich^h, and Roland Meynart^h

Zusammenfassung: Seit einigen Jahren beschäftigt sich eine schweizerische und belgische ESA Initiative mit der Entwicklung eines flugzeuggestützten Bildspektrometers, dem APEX (Airborne Prism Experiment). APEX ist speziell für die Aufgaben in der Umweltfernerkundung ausgelegt worden, d.h., insbesondere werden Untersuchungen der Vegetation und Böden ermöglicht. Ebenfalls besitzt der Anwendungsbereich Limnologie, Atmosphären- und Alpinforschung eine hohe Priorität. Diesen Anforderungen wird in wohl-definierten Spezifikationen Rechnung getragen. Die spektralen, geometrischen und radiometrischen Parameter erlauben es für rund 1000 Bodenpixel (Blickfeld von 28°) jeweils ein komplettes Spektrum im Wellenlängenbereich zwischen 380 und 2500 nm mit hoher spektraler Auflösung (VNIR: 1 – 10 nm; SWIR < 10 nm) simultan auszulesen. Hohe Priorität wird ebenfalls auf die spektrale, geometrische und radio-metrische Genauigkeit der Daten gelegt. Das Instrument ist z.Z. in Projektphase C/D, der sogenannten Entwicklungs- und Herstellungs-phase. Mit der Fertigstellung des Gerätes und der ersten Flugkampagne ist im Jahre 2006 zu rechnen.

Gleichzeitig mit der Fertigung des Sensors wird die PAF (Processing and Archiving Facility) entwickelt. Diese ermöglicht Abbildungsfehler und andere Imperfektionen des Bildspektrometers zu korrigieren. Weiterhin wird die PAF die Datenkalibrierung vornehmen. Hierfür wird auf Charakterisationsmessungen zurückgegriffen, die in der eigens für APEX entwickelten IFC (Inflight Calibration Unit) bzw. CHB (Calibration Homepage) vorgenommen werden. Die PAF ermöglicht ebenfalls jede Szene geometrisch und atmosphärisch zu korrigieren, um der Nutzer-gemeinschaft eine möglichst hohe Datenproduktqualität zu garantieren. Eine Besonderheit der PAF-Software ist es, dass sie sich über ein web-basiertes Interface aufrufen lässt. Hieraus kann in Zukunft eine neuartige Schnittstelle zwischen dem Entwickler von wissenschaftlichen Algorithmen und dem Enduser entstehen.

[#] corresponding author: nieke@geo.unizh.ch; phone/fax: +41 1 635 5260/6846; www.apex-esa.org

^a Remote Sensing Laboratories, University of Zürich, Winterthurerstrasse 190, CH-8057 Zürich

^b Vito – TAP, Boeretang 200, B-2400 Mol

^c HTS AG, Widenholzstrasse 1, CH-8304 Wallisellen

^d OIP Sensor Systems, Westerring 21, B-9700 Oudenaarde

^e Netcetera AG, Zypressenstrasse 71, CH-8040 Zürich

^f DLR - German Aerospace Center, Remote Sensing Technology Institute, D-82234 Wessling

^g Centre for Geo-Information, University Wageningen, NL-6708 Wageningen

^h ESA / Estec, Keplerlaan 1, NL-2200 Noordwijk

1. Introduction

The Remote Sensing Laboratories (RSL) identified in 1996 the necessity to initiate a project that concentrates on the definition of an airborne imaging spectrometer which could represent a precursor mission to future planned spaceborne imaging spectrometers. This project includes the definition of an airborne dispersive pushbroom imaging spectrometer (named 'Airborne Prism Experiment' (APEX)) that will contribute to the preparation, calibration, validation, simulation, and application development for future imaging spectrometer missions in space (NIEKE et al., 1997), as well as to the understanding of land processes and interactions at a local and regional (or national) scale (SCHAEPMAN et al., 2003-1), in support for global applications (Rast et al., 2001). The APEX project is implemented through ESA PRODEX (European Space Agency PROgramme de Développement d'EXpériences Scientifiques), which aims at providing funding for the industrial development of scientific instruments or experiments proposed by institutes or universities, which have been selected by ESA for one of its programs in the various fields of space research (e.g., Earth observation). ESA usually provides both, administrative, financial-management, and technical support (ESA, 2004).

The APEX project started in 1997 by performing a feasibility study on the design of an imaging spectrometer (ITTEN et al., 1997), which resulted in a first performance definition (SCHAEPMAN et al., 1998), and a subsequent design phase (SCHAEPMAN et al., 2000). Currently, various parts of APEX are being finalized in design, breadboarding and performance analysis of the processing chain (KAISER et al, 2003, SCHLAEPFER et al. 2003, BRAZILE, J. et al., 2003), and the subsequent construction of the instrument is planned to be final in 2006 (SCHAEPMAN et al. 2003).

Table 1: APEX Specifications

Specified Parameter	Value
Field of View (FOV)	$\pm 14^\circ$ deg
Instantaneous Field of View (IFOV)	0.48 mrad
Flight altitude	4'000 - 10'000 m.a.s.l.
Spectral channels	VNIR: approx. 140, SWIR: approx. 145
Spectral range	400 – 2500 nm
Spectral sampling interval	400 – 1050 nm: < 5 nm, 1050 – 2500 nm: < 10 nm
Spectral sampling width	< 1.5 * Spectral sampling interval
Center wavelength accuracy	< 0.2 nm
Spectral sampling width accuracy	< 0.02 * Spectral sampling width
PSF (Point Spread Function)	≤ 1.75 * Sampling interval
Spectral / Spatial Misregistration	< 0.1 pixel
Scanning mechanism	Pushbroom
Storage capacity on board (online / offline)	> 50 GByte / > 200 GByte
Dynamic Range	12 ... 16 bit

2. APEX Specifications

The APEX system has been specified as a combination of user requirements, which have been derived from a survey of imaging spectroscopy applications (SCHAEPMAN et al. 2001) and a subsequently derived forward performance model based on these requirements

(SCHLÄPFER et al. 2002). Applications cover all varieties of environmental remote sensing targets and research, such as vegetation and soil. APEX's performance will also enable to contribute to other mayor applications, such as coastal and inland water monitoring, atmospheric and alpine research.

3. Technical Description of APEX

APEX will allow for a flexible aircraft integration scheme. Therefore the instrument is subdivided into three major assemblies (Assy 1: Pilot interface, operator interface, computer (rack); Assy 2: APEX spectrometer including thermal enclosure and inertial unit; Assy 3: data and power harness). The APEX instrument itself is subdivided into the following components (c.f., Figure 1): An operator cockpit and pilot interface (OCI), a flight management system (FMS), the navigational subsystem (NSS), the central computer consisting of the control and data storage unit (CSU), a stabilized platform (STP), on which the opto-mechanical unit (OMU) is mounted and the type specific platform and aircraft interface (STPA-IF). The instrument is designed to be fully self-contained and is programmable using a software interface. Ground support equipment (GSE) is designed to integrate and remove the instrument for aircraft fuselage and store (or transport) the instrument from the airfield to the calibration home base and it's permanent storage location.

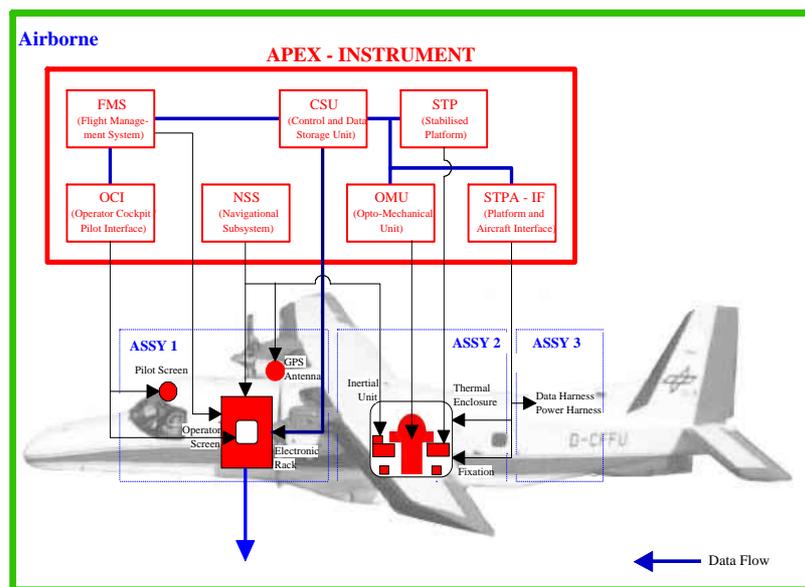


Figure 1: Schematic components and assemblies of APEX.

Technically, APEX is designed to be a dual prism dispersion pushbroom imaging spectrometer using a common ground imager with a slit in its image plane. The spectrometer consists of a collimator that directs the light transmitted by the slit towards the prisms, where a dichroic beam splitter separates the two spectrometer channels into the VNIR (Visible/Near Infrared, 380-1000 nm), and SWIR (Shortwave Infrared, 930-2500 nm) wavelength range. Following the dispersion of the prism (two for the VNIR, one for the SWIR), the spatially and spectrally resolved lines are re-imaged on the detector arrays. The light is dispersed onto 1000 spatial pixels across-track for both channels, with 312 spectral rows in the VNIR and 199 spectral rows in the SWIR. Flexible, programmable on-chip binning will allow summa-

izing the spectral bands to about 300 spectral rows for both detectors. Figure 2 depicts to the left the OMU and to the right the dual prism pushbroom spectrometer design.

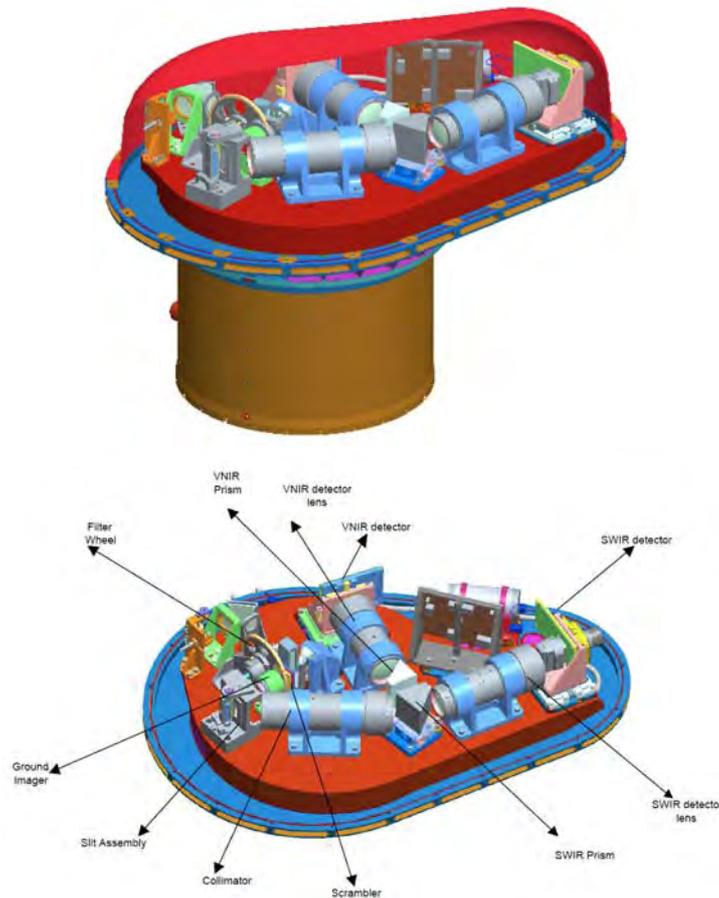


Figure 2: Left: APEX assembly of the opto-mechanical unit (OMU). Right: Optical base plate (OBP) with spectrometer details (right: SWIR detector, top: VNIR detector, top left: ground imager and filter wheel, bottom left: collimator, center: dual prisms).

An integral part of the spectrometer is a built-in ‘In-Flight’ Calibration facility (IFC), where a mirror will be shifted in the optical path to reflect the light of the internal stabilized QTH (Quartz Tungsten Halogen) lamp in the optical path of the spectrometer using a filter-wheel, a fiber bundle and a diffuser (see Figure 3). The filter-wheel consists of filters to enable relative spectral and radiometric calibration. In the form of a secondary calibration standard, the IFC measurements will be performed just before and after the ground observation data is taken.

The front end electronics of APEX are designed to support high read-out frame rates, and are located as close as possible to the detectors. After the analogue-digital conversion and the multiplexer of each spectral channel, the data is processed in an FPGA (Field Programmable Gate Array) to a stream of 16 bit words, which are then serialized and transmitted over an optical high-speed link at 700 Mbit/s. This link connects the APEX optical and mechanical structure to the operator’s console and computer.

The control and storage unit (CSU) of APEX is a dedicated rack in the aircraft, that hosts all the instrumentation required to operate APEX - in particular, the flight management system with an interface to the operator and the pilot, the inertial navigation system and the GPS

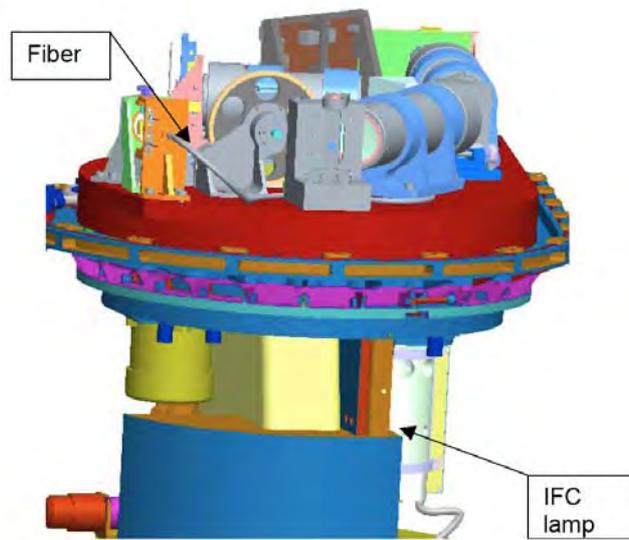


Figure 3: The in-flight calibration unit (IFC) enables relative spectral and radiometric calibration. The radiance of a stable light source is transferred via fiber to the optical path of the spectrometer.

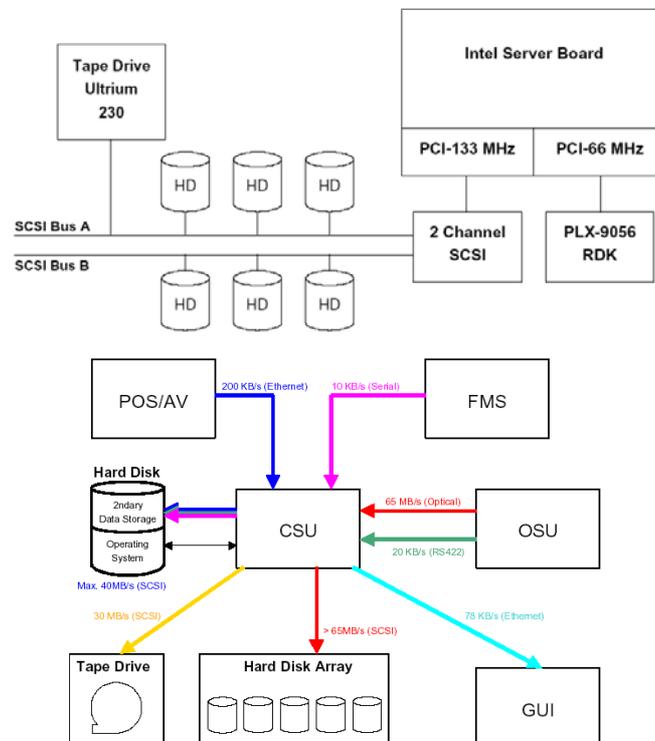


Figure 4: APEX schematic electronic setup (left) and data streams block diagram (right).

(Global Positioning System) processor, and the computer that interfaces the optical unit (connected over the high-speed link) and the storage unit (c.f., Figure 4, right). Most of the components used in this setup are commercially available, apart from a dedicated PCI (Peripheral Component Interconnect) card, which is needed to connect the optical unit through a PCI-bus interface to the host system. The host system (c.f., Figure 4, left) is composed of a commercial Intel server board with a 2 GHz Intel Xeon CPU (Central Processing Unit), 2 GByte of RAM (Random Access Memory), a dual-channel ultra-320 SCSI (Small Computer System Interface) controller (64bit/133MHz PCI) and 6 x 72 GByte Ultra-160 SCSI hard disks. The data exchange between the incoming data from the PCI card and the hard disks are implemented using multi-threaded shared memory architecture to ensure data throughput. The maximum transfer rate of the system is limited by the PCI bus bandwidth, nevertheless breadboarding activities have demonstrated sufficient margin available.

The CSU is driven by control software that is composed of low level interfaces (e.g., the disk read/write interface, etc.), a middle tier that handles the logging and alerting, the configuration of APEX operating modes using a configuration data base, and the operator interface, where system configuration, status, and a waterfall image are displayed during data takes. The control software also includes the synchronization mechanisms of the various subparts.

4. APEX Facilities

APEX will be supported by four major external facilities. This includes the Science Center, the Operational Center, the Calibration Home Base (CHB) and the Processing and Archiving Facility (PAF).

4.1 APEX Science Center

The APEX science center is hosted at RSL in Zurich (Switzerland). One objective of the science center is to foster the use of imaging spectrometer data and the development of new scientific algorithms in close cooperation with scientific users, experts and algorithm developers. Another objective is to monitor APEX calibration, validation and long-term performance. Also calls for airborne/field experiments will be announced in the center. In this center the new interface between PAF and algorithm developers will be established. A documentation of all algorithms is provided in form of algorithm theoretical basis documents.

4.2 APEX Operational Center

The APEX operational center is located in Mol (Belgium) and hosted by VITO. All user interactions (flight requests, archived data search, flight planning, user support, etc.) are carried out from this location. A description of the infrastructure is given in DEBRUYN et al. (2004).

4.3 Calibration Home Base (CHB)

The Calibration Home Base (CHB) with dedicated spectral, radiometric and geometric calibration facilities for full laboratory characterization and calibration of APEX. The calibration home base is located in Oberpfaffenhoffen at DLR near Munich (Germany).

4.4 Processing and Archiving Facility (PAF)

The APEX Processing and Archiving Facility (PAF) manages the data from acquisition and calibration to processing and dissemination. The processing chain is based on analyzing in-flight acquired image data, housekeeping information (e.g., navigation data, temperature), and on-board calibration data (using the above mentioned IFC). Moreover, the CHB allows the characterization and calibration of the geometric, radiometric and spatial sensor parameters. Using the outcome of the sensor calibration, the raw image data are converted to at-sensor radiance in SI (le Système international d'unités) units, traceable to a certified standard (e.g., NIST, NPL, PTB).

It is expected that individual flight campaigns will collect data on the order of 100s of GB that need to undergo an offline chain of data correction and characterization processes based on previously acquired and in-flight calibration parameters. This processing chain includes conversion of raw data values into SI units, bad pixel replacement, and corrections of smear, stray light, smile and frown anomalies. A simplified block diagram of the planned processing is illustrated in Figure 5. The data acquisition process produces the top four components on the left side in the Raw Data column. The lower two components are produced during intermission calibration of the instrument which takes place in the CHB.

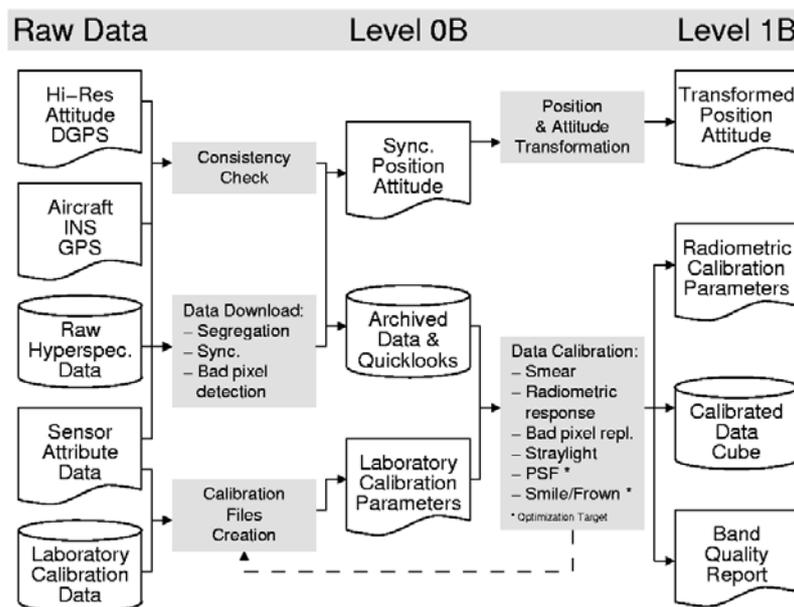


Figure 5: Generalized processing data flow from raw data until Level 1 B.

Since the raw data is generated during the flight in the onboard computer, this data need to be transferred to the off-line PAF computer. During this data transfer, quick consistency checks are made, and some simple constant-time operations can be performed such as bad pixel detection as well as generation of a high-resolution composite RGB pseudo-color quick-look

image. As a result, a calibrated at sensor radiance cube will be generated in the first processing step. This data will be channel wise corrected for spectral and spatial non-uniformities. Further processing steps will generate surface reflectance taking into account environmental conditions, such as the topography and atmosphere.

The PAF will generate three categories of products, i.e., standard, custom and research products. Whereas standard products are the result of automatic processing, they are generated for each flight/campaign. An example is the above mentioned Level 1b product. The second category of products are the custom products generated after special request and/or with user interaction. These products require semi-automatic processing of validated methods / algorithms. This is why they will be available upon user-request. An example would be an atmospherically and topographically corrected Level 1b product, where the user delivers correction measurements (in form of vicarious calibration results) or a special digital elevation model. The third category of products consists of research products, which will be processed by operator (or via special web-based GUI). This kind of product is available to dedicated scientific users only. The goal is to test new methods / algorithms, which are under development and still need to be validated. This research product generation is supported by the PAF software using a flexible plug-in structure. Algorithm developers are able to provide their own algorithms, so that third party users are able to make use of new routines and scientific calculations. A documentation of the algorithms is provided by the developers in form of algorithm theoretical basis documents.

5. CONCLUSIONS

Terrestrial ecosystems have been identified as being a critical component of the variability of the global carbon cycle. But given the natural diversity of landscapes, the instrumented measurement and validation approach remains challenging. Earth observation from airborne or spaceborne platforms is the only observational approach capable of providing data at the relevant scales and resolution needed to extrapolate findings of in situ (field) studies to larger areas, to document the heterogeneity of the landscape at regional scale and to connect these findings into a global view. Recent development of Earth observation satellites and airborne platforms demonstrate that imaging spectroscopy is a valuable tool for the quantification of relevant parameters, supporting processes within the carbon cycle (SCHAEPMAN et al., 2004, RAST et al. 2001). Even though a number of imaging spectrometers are available in space (e.g., MODIS, MERIS, Hyperion, etc.), their performances rely on an integrated approach, including a sound instrument design, a well implemented calibration strategy and finally a processing chain capable of handling large amounts of spectral data. Only a wide and fast dissemination of spectrometer data and their products will guarantee the required scientific attention and their inclusion in operational Earth observation systems. The presented APEX system will be a significant contribution to address the above said in a quantitative and qualitative manner.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work in this paper is being carried out under ESA/ESTEC contracts no. 16298/02/NL/US and 15449/01/NL/Sfe. The support of the University of Zürich is acknowledged.

REFERENCES

- BRAZILE, J., SCHAEPMAN, M., SCHLÄPFER, D., KAISER, J, AND ITTEN, K.: “A Beowulf-Style Cluster Processing Concept for Large Volume Imaging Spectroscopy Data”, Proc. Systemics, Cybernetics, and Informatics, Vol. X, 17-20, Orlando, 2003.
- DEBRUYN, W., I. REUSEN, P. KEMPENEERS, B. DERONDE & THE APEX TEAM: “The airborne imaging spectrometer APEX (Airborne Prism EXperiment): Overview and status questions”, Remote Sensing in Transition, Lillpress, Rotterdam, ISBN 9059660072 ESA, http://www.esa.int/export/esaCP/ASE0QUNW9SC_Benefits_0.html, Visited June 2004.
- ITTEN, K.I., SCHAEPMAN, M., DE VOS, L., HERMANS, L., SCHLAEPFER, H., AND DROZ, F.: “APEX – Airborne PRISM Experiment: A new concept for an airborne imaging spectrometer,” Proc. ERIM, Vol. 1, 181-188, 3rd Intl. Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 1997.
- KAISER J.W., SCHLÄPFER D., BRAZILE J., STROBL P., AND SCHAEPMAN M.E.: “Assimilation of heterogeneous calibration measurements for the APEX spectrometer”, Proc. SPIE, Vol. 5234, 211-220, 2003.
- NIEKE, J., SCHWARZER, H., NEUMANN, A., AND ZIMMERMANN, G.: “Imaging Spaceborne and Airborne Sensor Systems in the Beginning of the Next Century”, Proc. SPIE, Vol. 3221, 581-592, 1997.
- RAST, M., ed.: “SPECTRA - Surface Processes and Ecosystem Changes Through Response Analysis”, ESA Publications Division, Noordwijk, Vol. ESA SP-1279 (2), pp 66, 2003.
- SCHAEPMAN, M., DE VOS, L., AND ITTEN, K.I.: “APEX – Airborne PRISM Experiment: Hyperspectral radiometric performance analysis for the simulation of the future ESA Land Surface Processes Earth Explorer Mission,” Proc. SPIE, Vol. 3438, 253-262, 1998.
- SCHAEPMAN, M., SCHLÄPFER, D., AND ITTEN, K.: “APEX – A New Pushbroom Imaging Spectrometer for Imaging Spectroscopy Applications: Current Design and Status,” Proc. IGARSS, 828–830, Hawaii, 2000.
- SCHAEPMAN, M. ET AL.: “Performance and Calibration Requirements for APEX - Summary Final Report”, ESA/ESTEC Contract–No. 14906/00/NL/DC, 28, 2001.
- SCHAEPMAN, M., K.I. ITTEN, D. SCHLÄPFER, J.W. KAISER, J. BRAZILE, W. DEBRUYN, A. NEUKOM, H. FEUSI, P. ADOLPH, R. MOSER, T. SCHILLIGER, DE VOS, L., G. BRANDT, P. KOHLER, M. MENG, J. PIESBERGEN, P. STROBL, J. GAVIRA, G. ULBRICH, AND R. MEYNART: “APEX: Current status of the airborne dispersive pushbroom imaging spectrometer”, Proc. SPIE, Vol. 5234, 202-210, 2003.
- SCHAEPMAN, M., KOETZ, B., SCHAEPMAN-STRUB, G., ZIMMERMANN, N.E., & ITTEN, K.I.: “Quantitative retrieval of biogeophysical characteristics using imaging spectroscopy - a mountain forest case study”, Community Ecology, 5, 93-104, 2004.
- SCHLÄPFER, D. AND SCHAEPMAN, M.: “Modelling the noise equivalent radiance requirements of imaging spectrometers based on scientific applications”, Appl. Optics 41(27), 5691-5701, 2002.

BESTIMMUNG DER ÄUßEREN ORIENTIERUNG DES MARS EXPRESS ORBITERS

**C. HEIPKE¹, R. SCHMIDT¹, H. EBNER², M. SPIEGEL²,
G. NEUKUM³ UND DAS HRSC CO-INVESTIGATOR TEAM**

Zusammenfassung: Seit Januar 2004 bildet die High Resolution Stereo Camera (HRSC) an Bord der ESA (European Space Agency) Mission Mars Express die Oberfläche des Planeten Mars in Farbe, stereoskopisch und in hoher Auflösung ab. Das Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI) der Universität Hannover und der Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung (LPF) der Technischen Universität München prozessieren gemeinsam die Daten der HRSC: Während der zwei Jahre dauernden Mission wird in einer kombinierten Bündelausgleichung unter Verwendung automatisch extrahierter Verknüpfungspunkte und Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) Daten die äußere Orientierung der Mars Express Sonde bestimmt. Diese Arbeit beschreibt die verwendeten Methoden der digitalen Bildzuordnung zur Bestimmung der Verknüpfungspunkte und die BA. Anhand von drei Orbits werden die Ergebnisse des Matching und die erzielten Genauigkeiten der BA präsentiert und bewertet.

1 Einleitung

Im Juni 2003 ist vom Kosmodrom in Baikonur, Kasachstan die ESA Mission Mars Express gestartet worden. Nach einer sechsmonatigen Reise ist die Sonde erfolgreich in eine polare Umlaufbahn um den Mars eingeschwenkt worden. Während der zwei Jahre dauernden Mission wird die High Resolution Stereo Camera (HRSC) einen Großteil der Marsoberfläche aufnehmen. Die HRSC ist ein Zeilenscanner und besteht aus insgesamt neun parallel angeordneten CCD-Sensoren, die eine simultane Bildaufnahme stereoskopisch und multispektral ermöglichen (ALBERTZ ET AL., 1993). Im Perizentrum – etwa 300 km über der Marsoberfläche – wird eine Bodenauflösung von etwa 12 m erreicht. Die Camera Unit (CU) der HRSC beinhaltet zusätzlich einen Super Resolution Channel (SRC), der flächenhafte im HRSC-Schwad eingebettete Bilder mit einer Auflösung von bis zu 2,5 m liefern kann.

Die dreidimensionale Position und Lage der Sonde wird fortwährend von der ESA durch Kombination von Dopplermessungen, Entfernungsmessungen, Triangulationen und eines Sternensensors bestimmt. Diese Messungen resultieren in einer dreidimensionalen Position und Lage von Mars Express in Abhängigkeit von der Zeit, die als genäherte äußere Orientierung in der klassischen Photogrammetrie angesehen werden kann. Allerdings reichen diese Werte für eine hochgenaue photogrammetrische Punktbestimmung nicht aus. Aus diesem Grund werden diese Messungen als Näherungswerte für die unbekannt Parameter der äußeren Orientierung in die Bündelausgleichung (BA) eingeführt. Außerdem werden in der BA aus digitaler Bildzuordnung gewonnene Verknüpfungspunkte verwendet. Um die Ergeb-

¹ Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke / Dipl.-Ing. Ralph Schmidt, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover, Nienburger Str. 1, 30167 Hannover, Germany, schmidt@ipi.uni-hannover.de

² Prof. Dr.-Ing. Heinrich Ebner / Dipl.-Ing. Michael Spiegel, Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München, Germany, spiegel@bv.tum.de

³ Prof. Dr. G. Neukum, Institut für Geologie, Geophysik und Geoinformatik, Freie Universität Berlin, Malteserstr. 74-100, 12249 Berlin, Germany, gneukum@zedat.fu-berlin.de

nisse in ein marsfestes Koordinatensystem transformieren zu können, werden zusätzlich Passpunkte benötigt. Da auf dem Mars nur wenige klassische Passpunkte mit nur einer geringen Genauigkeit existieren, wird hierfür ein global vorhandenes digitales Geländemodell (DGM) verwendet.

In Kapitel zwei dieser Arbeit werden die angewandten Methoden der photogrammetrischen Punktbestimmung, der digitalen Bildzuordnung und der BA vorgestellt. In Kapitel drei werden die Ergebnisse des Matching und die erzielten Genauigkeiten der BA präsentiert und diskutiert.

2 Photogrammetrische Punktbestimmung

Die Prozessierung der HRSC Daten gliedert sich in zwei Arbeitsschritte. Zunächst werden Verknüpfungspunkte mit einer am IPI Hannover entwickelten Software extrahiert. Diese Verknüpfungspunkte dienen zusammen mit der beobachteten äußeren Orientierung und dem DGM als Eingangsdaten für die BA, die am LPF in München entwickelt wurde. Mit der resultierenden verbesserten äußeren Orientierung des Mars Express Orbiters ist es möglich, hochwertige abgeleitete Produkte wie DGMs, Orthophotos und 3D-Ansichten aus den Bildern zu erstellen.

Das Prinzip der Punktübertragung von Objekt- zu Bildkoordinaten bei 3-Zeilen-Scannern wird in BRAND ET AL. (1997) erläutert. Ausgangspunkt sind die erweiterten Kollinearitätsgleichungen für 3-Zeilen-Scanner (EBNER ET AL., 1994):

$$\begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ -c \end{pmatrix} = \lambda M^T (\Delta\varphi, \Delta\omega, \Delta\kappa) D^T (\varphi, \omega, \kappa) \left[\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_0 + \Delta X_0 \\ Y_0 + \Delta Y_0 \\ Z_0 + \Delta Z_0 \end{pmatrix} \right] \quad (1)$$

Die äußere Orientierung bezieht sich auf ein Kamerakoordinatensystem, welches für alle CCD-Zeilen gemeinsam definiert ist. Für einen bestimmten Auslesezyklus n ist die äußere Orientierung durch $X_0, Y_0, Z_0, \varphi, \omega, \kappa$ gegeben. Die innere Orientierung ist durch die drei Parameter x_0, y_0, c pro CCD-Zeile im Bildkoordinatensystem definiert. Die Transformation zwischen dem Bild- und dem Kamerakoordinatensystem ist durch $\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0, \Delta\varphi, \Delta\omega, \Delta\kappa$ gegeben, die bei einer geometrischen Kalibrierung für jede CCD-Zeile bestimmt wurden. M und D sind Rotationsmatrizen, λ ist ein Maßstabsfaktor. Die Bildkoordinaten sind durch x und y gegeben, welche durch digitale Bildzuordnung automatisch bestimmt werden.

Die innere Orientierung der HRSC wurde in einem Labor bei Dornier, Friedrichshafen kalibriert und während der sechsmonatigen Reise zum Mars durch Sternenbeobachtungen überprüft. Bisher konnten keine Abweichungen von der Kalibrierung festgestellt werden, so dass die innere Orientierung als stabil betrachtet wird.

2.1 Matching

Die Bildzuordnung folgt einer „vom Groben ins Feine“-Strategie, d.h. das Matching-Ergebnis wird schrittweise durch Bildpyramiden verbessert. Als Eingangsdaten werden die HRSC-Bilder, die beobachtete äußere Orientierung und die Kalibrierungsdaten der inneren Orientierung benötigt. Zusätzlich kann ein DGM als Näherungsinformation genutzt werden.

Auf dem Mars ist ein hochgenaues DGM vorhanden, welches aus Daten des MOLA-Instruments abgeleitet wurde (NEUMANN ET AL., 2003).

Zu Beginn werden Punktmerkmale mit Hilfe des Förstner-Operators (FÖRSTNER, 1986) extrahiert, und die Bilder werden paarweise in allen Kombinationen zugeordnet, wobei der Kreuzkorrelationskoeffizient als Ähnlichkeitsmaß dient. Jedes Bild wird in Unterbereiche eingeteilt, um eine gleichmäßige Verteilung der Verknüpfungspunkte über den gesamten Bereich sicherzustellen. Um Mehrdeutigkeiten und Rechenzeit zu reduzieren, werden bei der Übertragung eines Features von einem Bild zum nächsten eine Näherungsposition und ein Suchraum für den korrespondierenden Punkt berechnet. Da für 3-Zeilen-Scanner keine Epipolargeometrie existiert, wird ein Feature von einem Bild zum nächsten nach Formel (1) transformiert. Für die Transformation vom Objekt- zum Bildkoordinatensystem als Funktion der Bildzeile (Auslesezyklus) n muss eine zusätzliche Bedingung (2) erfüllt sein, wobei x in Flugrichtung zeigt.

$$x(n) = x(n, X_0(n), Y_0(n), Z_0(n), \varphi(n), \omega(n), \kappa(n)) = 0 \quad (2)$$

Dieses Problem kann mit der bekannten Newton-Methode für die obige Nullstellensuche gelöst werden, wobei die Ableitung $x'(n_i)$ durch die Pixelgröße des Bildes ersetzt wird.

$$\begin{aligned} n_0 &= \text{Initialisierungswert für die Bildzeile} \\ n_{i+1} &= n_i - x(n_i) / \text{Pixelgröße} \quad i = 0, 1, \dots \end{aligned} \quad (3)$$

Nachdem alle überlappenden Bilder paarweise in allen Kombinationen gematcht wurden, wird ein ungerichteter Graph aufgebaut. Die Knoten des Graphen sind die Punktmerkmale, die Kanten sind die Matching-Verbindungen untereinander. Dieser Graph wird in Zusammenhangskomponenten unterteilt. Im nächsten Schritt werden die Punkt-Tupel gebildet, wobei ein Tupel dadurch charakterisiert ist, dass nur ein Feature pro Bild zugelassen wird. Die Komplexität dieses Problems kann allerdings exponentiell wachsen. Anstatt Suchbäume oder Binärsuche anzuwenden, wird ein RANSAC (Random Sample Consensus) Algorithmus (FISCHLER & BOLLES, 1981) verwendet. Diese Methode beruht auf der Tatsache, dass die Wahrscheinlichkeit, eine gute Konfiguration (richtiges Tupel) durch zufällige Auswahl von Beobachtungen (Feature eines Teilgraphen) zu treffen, nach einer bestimmten Zahl von Versuchen sehr hoch ist. Der Vorteil daran ist die hohe Wahrscheinlichkeit, einen guten Punkt zu erhalten. Durch eine geometrische Konsistenzprüfung werden außerdem grobe Fehler eliminiert (BRAND & HEIPKE, 1998).

Von der Startpyramide (niedrigste Auflösung) bis zur so genannten Zwischenebene (mittlere Auflösung) wird das Feature Based Matching (FBM) im gesamten Bild durchgeführt. Bewegt man sich auf der Bildpyramide nach unten, steigt sowohl die Bildgröße als auch die Anzahl der extrahierten Features. Das Matchen im gesamten Bild würde neben der stark ansteigenden Rechenzeit auch zu viele Verknüpfungspunkte für die Kameraorientierung liefern. Daher wird das Matching unterhalb der Zwischenebene lediglich in ausgewählten „Image Chips“ durchgeführt. Das bedeutet, dass korrespondierende Punkte nur in Bereichen gesucht werden, in denen schon vorher Punkte aufgrund guter Textur gefunden wurden (TANG & HEIPKE, 1996).

Um das Matching-Ergebnis weiter zu verfeinern, wird Multi Image Least Squares Matching (MILSM) nach dem Ansatz von KRUPNIK (1994) durchgeführt, in dem die Verknüpfungspunkte in allen Bildern gleichzeitig gematcht werden. Eine detaillierte Beschreibung des

implementierten Verfahrens befindet sich in HEIPKE ET AL. (2004). Da Least Squares Matching (LSM) das genaueste Bildzuordnungsverfahren ist, kann das Ergebnis des FBM verbessert werden. In unserer Implementierung kann pro Pyramidenlevel entschieden werden, ob MILSM angesetzt werden soll oder nicht. Um Rechenzeit zu sparen, ist es sinnvoll, nur auf der letzten Ebene (Originalauflösung) MILSM durchzuführen.

Am Schluss werden durch Vorwärtseinschneiden der Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte Modellpunkte berechnet. Diese dienen anstatt der MOLA-Punkte als Näherungsinformation zur Suchraumminimierung auf der nächstniedrigeren Ebene. Eine detailliertere Beschreibung des Matching-Verfahrens ist in SCHMIDT & BRAND (2003) beschrieben.

2.2 Bündelausgleichung mit Passinformation

Die BA nutzt das von HOFMANN ET AL. (1982) vorgeschlagene Konzept, bei dem die Parameter der äußeren Orientierung nur an wenigen ausgewählten Bildzeilen, den so genannten Orientierungsbildern, bestimmt werden (SPIEGEL ET AL., 2003). Die äußere Orientierung aller anderen Bildzeilen wird aus den Werten der Orientierungsbilder interpoliert. Die Unterschiede an jeder Bildzeile werden als Korrekturterm betrachtet, der zu den interpolierten Werten addiert werden muss. Diese Methode hält die Anzahl der Orientierungsparameter niedrig und, was noch wichtiger ist, berücksichtigt die gute relative Genauigkeit der beobachteten Orientierungsparameter. Das mathematische Modell für die photogrammetrische Punktbestimmung mit einer 3-Zeilen-Kamera basiert auf den bekannten Kollinearitätsgleichungen (1).

Ausgangspunkt der Diskussion über die Nutzung eines DGMs als Passinformation in der BA ist ein von SPIEGEL ET AL. (2003) vorgestellter Ansatz. Dieser verwendet die Kleinste-Quadrate-Ausgleichung mit zusätzlichen Bedingungen, um einen Zusammenhang zwischen DGM und BA ohne Passpunkte herzustellen. Im Fall vom Mars ist es möglich, MOLA-Daten als Passinformation zu nutzen. Ein Weg ist die Nutzung der von MOLA-Punkten abgeleiteten Geländeoberfläche, in welche die zugeordneten HRSC-Bildpunkte eingepasst werden. Da mehr MOLA-Punkte als HRSC-Punkte vorhanden sind, ist dieser Ansatz vorteilhaft.

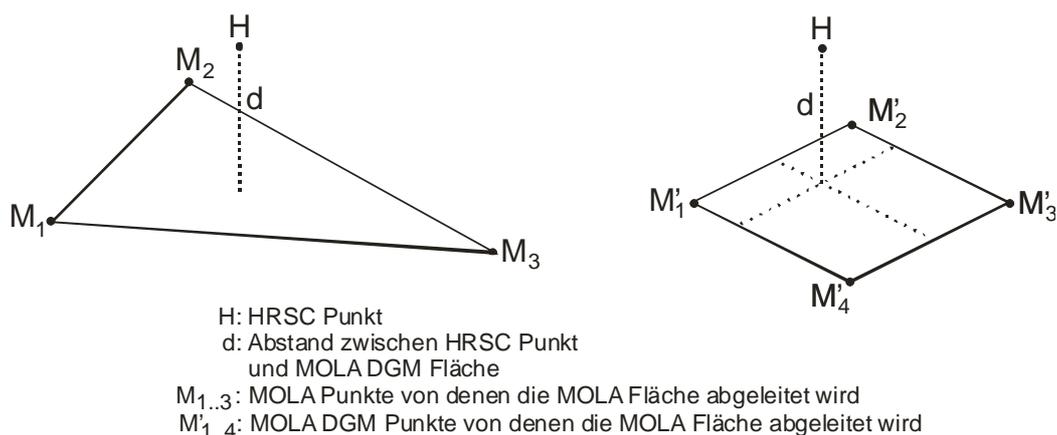


Abb. 1: Links: Oberfläche aus original MOLA Punkten. Rechts: Gleichmäßiges DGM Gitter

An Stellen, an denen HRSC-Punkte verfügbar sind, können die MOLA-Daten als lokale Flächen beschrieben werden. Eine Fläche kann entweder von drei originalen MOLA-Punkten oder von vier MOLA DGM Rasterpunkten aufgespannt werden, wobei die DGM-Punkte wiederum aus den originalen MOLA-Punkten interpoliert werden. Im ersten Fall ist die

Fläche eine Ebene, die durch drei unregelmäßig angeordnete MOLA Punkte beschrieben wird. Hierbei wird der vertikale Abstand d vom HRSC-Punkt H zur Ebene (M_1 , M_2 und M_3) definiert (Abb. 1, links). Im zweiten Fall, soll der HRSC-Punkt auf einer bilinearen Fläche liegen, die durch vier benachbarte MOLA-Punkte definiert ist, welche den HRSC-Punkt umschließen und eine Gitterstruktur aufweisen. Die Distanz d ist als Abstand zwischen dem HRSC-Punkt H und der bilinearen Fläche definiert, welche von den vier Punkten M'_1 , M'_2 , M'_3 und M'_4 (Abb. 1, rechts) festgelegt ist. In der verwendeten BA wird letzterer Ansatz angewandt, da die Vorteile des MOLA DGMS gegenüber den rohen MOLA-Daten überwiegen.

Das mathematische Model der BA ist in Gleichung (4) angegeben,

$$\begin{aligned} v_x &= f(X, Y, Z, x_0, y_0, c, X_0, Y_0, Z_0, \varphi, \omega, \kappa) - x_i \\ v_y &= f(X, Y, Z, x_0, y_0, c, X_0, Y_0, Z_0, \varphi, \omega, \kappa) - y_i \end{aligned} \quad (4)$$

mit:

$$X_0 = \bar{X}_{B_0} + \bar{X}_0, \quad Y_0 = \bar{Y}_{B_0} + \bar{Y}_0, \quad Z_0 = \bar{Z}_{B_0} + \bar{Z}_0, \quad \varphi = \bar{\varphi}_B + \bar{\varphi}, \quad \omega = \bar{\omega}_B + \bar{\omega}, \quad \kappa = \bar{\kappa}_B + \bar{\kappa}$$

wobei sich die äußere Orientierung aus Nullpunktskorrekturen ($\bar{X}_{B_0}, \bar{Y}_{B_0}, \bar{Z}_{B_0}, \bar{\varphi}_B, \bar{\omega}_B, \bar{\kappa}_B$) (im Weiteren wird der engl. Begriff Bias verwendet), die für den ganzen Streifen Gültigkeit haben, und Termen ($\bar{X}_0, \bar{Y}_0, \bar{Z}_0, \bar{\varphi}, \bar{\omega}, \bar{\kappa}$), die nur für jeweils eine Zeile gelten, zusammensetzen.

Zusätzlich wird für jeden HRSC-Punkt nur eine Beobachtungsgleichung (5)

$$v_d + d = f(X_H, Y_H, Z_H, X_{M_i}, Y_{M_i}, Z_{M_i}) \quad i = 1..4 \quad (5)$$

mit drei Unbekannten (X , Y , Z der HRSC-Verknüpfungspunkte), einer Beobachtung (Differenz d zwischen HRSC Punkt und MOLA Oberfläche) und zwölf Konstanten (X , Y , Z für alle vier MOLA DGM Punkte) genutzt. Die Genauigkeit der beobachteten Differenzen wird für das weiter verfolgte Verfahren direkt durch die Genauigkeit der MOLA Punkte bestimmt.

3 Auswertung von HRSC Bildern

In diesem Abschnitt werden zuerst die ausgewerteten HRSC-Bilder beschrieben. Die Ergebnisse des Matchings und der BA werden im zweiten Teil auf Basis der Orbits 18, 22 und 68 präsentiert und diskutiert.

3.1 Daten

Jede CCD Zeile der HRSC besteht aus 5176 aktiven Pixeln, welche auf der Marsoberfläche eine Breite von etwa 65 km abdecken. Die Streifen können aus bis zu 300.000 Zeilen bestehen und einen Bereich auf der Oberfläche von 4.000 km in Flugrichtung überdecken. Aufgrund einer limitierten Übertragungsbandbreite zwischen Mars und Erde kann nur der Nadir-Kanal mit der vollen Auflösung empfangen werden. Die Auflösung der zwei Stereokanäle wird im Allgemeinen um einen Faktor von 2, die restlichen Kanäle um einen Faktor von 4 reduziert. Um die gleiche Skalierung der Kanäle zu erreichen wird der Nadir-Kanal für das Matching auf die Auflösung der Stereokanäle umgerechnet. Abhängig von der überdeck-

ten Marsregion zeigen die Bilder Bereiche mit guter Textur und Bereiche mit sehr geringem Kontrast (Abb. 2).

Die vorliegende Untersuchung beruht auf Bilderstreifen der Orbits 18, 22 und 68, die zu Beginn der Aufnahme phase der Mars Express Mission aufgenommen wurden. Die Beobachtungen der äußeren Orientierung, die Kalibrierungsdaten der inneren Orientierung, sowie das MOLA DGM werden als Input für das Matching und die BA genutzt. Außerdem werden die HRSC Bilder für das Matching verwendet. Die a priori Genauigkeit der äußeren Orientierung wurde mit einem Wert von 1000 m für die Position und 28 mgon für die Lage in die BA eingeführt. Die Flugbahn des Orbiters wird als sehr stabil betrachtet.

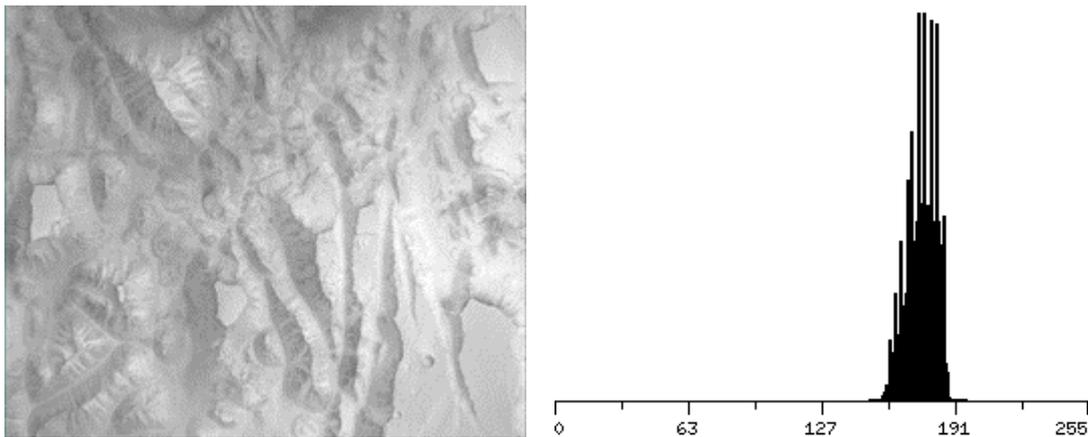


Abb. 2: Links: Ausschnitt aus Orbit 68 mit guter Textur. Rechts: Histogramm aus Bildregion mit niedrigem Kontrast

3.2 Ergebnisse

3.2.1 Matching-Ergebnisse

In einer ersten Auswertung werden die reinen Strahlenschnitte der Verknüpfungspunkte analysiert. Die von der ESA bestimmten Werte der äußeren Orientierung werden als fehlerfrei eingeführt und es wird kein DGM in der BA genutzt. Dieses Vorgehen kann als Vorwärtsschnitt betrachtet werden. Die erreichten Werte werden mit den Ergebnissen der BA verglichen, bei der für φ and κ jeweils ein Bias für die ganze Bahn geschätzt wird. Ein Bias für φ and κ wird eingeführt, da nur diese zwei Parameter durch die alleinige Nutzung der Verknüpfungspunkte verbessert werden können. Der Bias für die anderen vier Orientierungsparameter X_0 , Y_0 , Z_0 und ω kann nur durch Passinformation bestimmt werden.

Orbit	Höhe [km]	σ_X [m]	σ_Y [m]	σ_Z [m]
18	275 - 347	11,0 / 5,9	13,0 / 6,6	34,0 / 18,0
22	311 - 941	13,0 / 7,8	18,0 / 9,2	42,0 / 22,0
68	269 - 505	30,3 / 10,3	26,6 / 10,9	48,8 / 17,8

Tab. 1: Theoretische Standardabweichung der Objektkoordinaten

Tab. 1 zeigt die Genauigkeiten der Objektkoordinaten der Strahlenschnitte für die ausgewählten Orbits. Der linke Wert ist die Standardabweichung der Strahlenschnitte mit der von der ESA gegebenen äußeren Orientierung. Der rechte Wert zeigt die für die Strahlenschnitte erreichte theoretische Standardabweichung nach der Verbesserung von φ and κ . Die Stan-

Standardabweichung aller untersuchten Orbits liegt im Bereich von etwa 6 bis 11 m in X und Y, abhängig von den unterschiedlichen Flughöhen. Die Z Genauigkeiten von allen Orbits liegen im Bereich von etwa 18 bis 22 m. Die Standardabweichung der Strahlenschnitte wird um den Faktor 2 bis 3 verbessert, und eine abschließende Genauigkeit von etwa 0.4 Pixel in X und Y und 0.8 Pixel in Z wird erreicht.

3.2.2 Ergebnisse der Bündelausgleichung

Der zweite Teil der Ergebnisse der Auswertung zeigt die Genauigkeiten nach dem Einpassen der HRSC-Punkte ins MOLA DGM. Hier wird der Bias aller sechs Parameter der äußeren Orientierung (X_0 , Y_0 , Z_0 , φ , ω , κ) entlang der gesamten Flugbahn verbessert. Tab. 2 zeigt die verbesserten Werte und deren Standardabweichungen für die drei Orbits. In den meisten Fällen können die Werte hoch signifikant bestimmt werden, da die Genauigkeiten des Bias geringer als die Werte des Bias selbst sind.

Orbit		X_0 [m]	Y_0 [m]	Z_0 [m]	φ [mgon]	ω [mgon]	κ [mgon]
18	Bias Wert	90,4	-64,6	-38,2	-51,1	-64,4	-6,2
	Bias σ	7,3	11,0	1,6	0,3	1,5	0,1
22	Bias Wert	-300,5	-183,9	-81,8	-70,1	-26,3	-8,9
	Bias σ	24,5	39,5	3,5	0,5	2,7	0,7
68	Bias Wert	-12,1	-112,3	-41,2	-24,9	-12,1	-35,9
	Bias σ	10,7	16,7	6,7	0,4	1,9	0,6

Tab. 2: Theoretische Standardabweichung der Orbitbestimmung

Die Standardabweichungen der Objektkoordinaten sind in Tab. 3 für die Orbits 18, 22 und 68 dargestellt und hängen von zwei Ergebnissen ab. Dies sind zum einen die Genauigkeiten der Strahlenschnitte (Tab. 1), die die Genauigkeit innerhalb des Orbits darstellen und zum anderen die Genauigkeiten der absoluten Orientierung zwischen Orbit und MOLA DGM (Tab. 2). Die absolute Genauigkeit der Punktbestimmung ist deshalb eine Kombination dieser beiden Genauigkeiten. Die Standardabweichung der Objektpunkte in allen 3 Dimensionen beträgt weniger als 20 m. Aufgrund der höheren Flughöhe sind die Standardabweichungen bei Orbit 22 etwas größer.

Orbit	σ_X [m]	σ_Y [m]	σ_Z [m]
18	9,1	10,6	17,0
22	25,6	35,4	20,9
68	14,4	16,7	17,5

Tab. 3: Theoretische Standardabweichung der in das MOLA DGM eingepassten HRSC Punkte

Schließlich wurden die quadratischen Mittelwerte (RMS) der Z-Differenzen zwischen den Objektkoordinaten der HRSC-Verknüpfungspunkte und dem MOLA DGM untersucht. Hierbei wurden die Ergebnisse ohne DGM als Passinformation mit den Ergebnissen der BA mit DGM als Passinformation verglichen. Die RMS der Z-Differenzen zwischen DGM und HRSC-Objektpunkten liegen im Bereich von 200 m (Orbit 18: 177 m, Orbit 22: 268 m, Orbit 68: 200 m). Nach der BA unter Nutzung des DGMs als Passinformation reduzieren sich die RMS Z-Differenzen um einen Faktor von 3 (Orbit 18: 84 m, Orbit 22: 56 m, Orbit 68: 63 m). Aufgrund dessen war die Anpassung der HRSC-Daten auf das MOLA-Referenzsystem erfolgreich.

4 Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen die Effizienz der Ansätze der Bildzuordnung und der BA mit dem MOLA DGM als Passinformation zur Verbesserung der äußeren Orientierung. Die Verknüpfungspunkte waren im Allgemeinen mit einer ausreichenden Anzahl von 3-Strahlpunkten gleichmäßig über den ganzen Bildstreifen verteilt. Es wurde eine Genauigkeit von 0.4 Pixel in der Lage und 0.8 Pixel in der Höhe erreicht. Eine signifikante Verbesserung der Positionsparameter der äußeren Orientierung von einer gegebenen a priori Genauigkeit von 1000 m auf weniger als 20 m (bzw. bei Orbit 22 etwas mehr) in allen drei Koordinatenrichtungen (Tab. 2) wurde erzielt. Auch die Genauigkeit der Lage verbesserte sich von 28 mgon auf 1-2 mgon in allen drei Drehwinkeln. Somit kann die Position und die Lage um einen durchschnittlichen Faktor von 30 bis 50 verbessert werden. Durch diese Steigerung der Genauigkeit der Parameter der äußeren Orientierung der HRSC wurde eine substantielle Genauigkeitssteigerung der Objektkoordinaten der Verknüpfungspunkte und gleichzeitig eine hohe Konsistenz zwischen HRSC Punkten und MOLA DGM erreicht, welches das gültige Referenzsystem auf dem Mars darstellt.

5 Literaturverzeichnis

- ALBERTZ, J., SCHOLTEN, F., EBNER, H., HEIPKE, C., NEUKUM, G., 1993: Two camera experiments on the Mars 94/96 missions, *Geo-Informationen-Systeme* (6) 4, S. 11-16.
- BRAND, R., OHLHOF, T., STEPHANI, M., 1997: Processing of 3-line imagery on a digital photogrammetric workstation, McKeown, Jr., D., M., McGlone, J. C., Jamet O. (HRSG.): Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision III, (3072), *Proceedings of SPIE*, Orlando, Florida, S. 2-10.
- BRAND, R., HEIPKE, C., 1998: A system for automatic aerial triangulation, *IntArchPhRS* (32) 2, S. 27-32.
- EBNER, H., KORNUS, W., OHLHOF, T., 1994: A simulation study on point determination for the MOMS-02/D2 space project using an extended functional model, *Geo-Informationen-Systeme* (7) 1, S. 11-16.
- FISCHLER, M.A., BOLLES, R.C., 1981: Random Sample Consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, *Communications of the ACM* (24) 6, S. 381-395.
- FÖRSTNER, W., 1986: A feature based correspondence algorithm for image matching, *IntArchPhRS* (26) 3/3, S. 150-166.
- HEIPKE, C., SCHMIDT, R., BRAND, R., OBERST, J., NEUKUM, G. AND THE HRSC CO-INVESTIGATOR TEAM, 2004: Performance of automatic tie point extraction using HRSC imagery of the Mars Express mission, *IntArchPhRS* (35).
- HOFMANN, O., NAVÉ, P., EBNER, H., 1982: DPS – A digital photogrammetric system for producing digital elevation models and orthophotos by means of linear array scanner imagery, *IntArchPhRS* (24) 3, S. 216-227.
- KRUPNIK, A., 1994: Multiple-patch matching in the object space for aerotriangulation, Technical Report 428, Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus.
- NEUMANN, G.A., LEMOINE, F.G., SMITH, D.E., ZUBER, M.T., 2003: The Mars Orbiter Laser Altimeter archive: Final precision experiment data record release and status of radiometry, *Lunar Planet. Sci. XXXIV*, Lunar and Planetary Institute, Houston.

- SCHMIDT, R., BRAND, R., 2003: Automatic determination of tie points for HRSC on Mars Express, ISPRS Workshop High Resolution Mapping from Space 2003, October 6-8, Hannover.
- SPIEGEL, M., BAUMGARTNER, A., EBNER, H., 2003: Orientation of Mars Express/HRSC imagery using laser altimeter data as control information, ISPRS Workshop High Resolution Mapping from Space 2003, October 6-8, Hannover.
- TANG, L., HEIPKE, C., 2003: Automatic relative orientation of aerial images, PE&RS (62) 1, S. 47-55.

6 Danksagung

Diese Arbeit wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung durch das Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) unter den Förderkennzeichen 50 QM 0103 und 50 QM 0104 gefördert.

Kombinierter Einsatz von Zeilenkamera und inertialem Messsystem

D.GRIESBACH¹, A. BÖRNER², M. SCHEELE³, K. SCHEIBE⁴,
S. SUJEW⁵, T. Bodenmüller⁶, M. Suppa⁷

Zusammenfassung: Zur Erzeugung der zweiten Bilddimension sind Bildaufnahmen mit einer Zeilenkamera immer mit einer Bewegung der Bildzeile gegenüber dem Objekt, z.B. einer Rotation oder einer Translation, verbunden. Diese Bewegung ist nicht frei von externen Einflüssen. Analog zur modernen Luftbild-Photogrammetrie wird die Bewegung der Kamera gemessen. Als Bildaufnahmesystem kommt die EYESCAN M3metric der Firma KST zum Einsatz, welche mit dem Inertialen Messsystem POS-AV 410 der Firma Applanix gekoppelt ist. Erste Tests wurden mit einer rotierenden Kamera absolviert. Mit Hilfe der Orientierungsdaten konnte ein entzerrtes Bild berechnet werden. In einer weiteren Testreihe wurde die Kamera auf einem Auto montiert und eine Hausfassade aufgenommen (Translationsbewegung). Des Weiteren konnte die Stereofähigkeit der auf einer RGB-Zeile basierenden Kamera nachgewiesen werden.



Abb. 1: Korrigiertes Bild (Überblick)

1. Einleitung

CCD-Zeilenkameras werden in der Fernerkundung und Luftbildphotogrammetrie seit Jahren eingesetzt. In der Nahbereichsphotogrammetrie gibt es erst seit kurzem (REULKE, et al 2003) Erfahrungen zur Verwendung von CCD-Zeilenkameras. Für den Bildaufbau ist im Gegensatz zu einer Matrixkamera eine Scanbewegung notwendig. Dieser Nachteil wird durch die um Faktoren höhere Bilddimension ausgeglichen. Ist diese Scanbewegung, wie beim Flugzeugeinsatz, mit Störungen behaftet, so müssen diese mit entsprechender Genauigkeit gemessen werden. Die für diese Arbeit verwendete Kamera war ein Entwicklungsmuster der EYESCAN M3metric der Firma KST Dresden (SCHEIBE, et al 2001). Der Bildsensor ist eine RGB Zeile von Kodak mit 10296 Pixel pro Farbkanal. Das verwendete inertielle Messsystem war das POS-AV 410 der Firma Applanix Corp, in das eine IMU LN200 integriert ist. Es wurde untersucht, inwieweit gestörte Rotations- und Translationsbewegungen während der Bildaufnahme korrigiert werden konnten.

¹ Denis Grießbach, e-mail: denis.griessbach@web.de

² Dr. Anko Börner, e-mail: anko.boerner@dlr.de

³ Dr. Martin Scheele, e-mail: martin.scheele @dlr.de

⁴ Karsten Scheibe, e-mail: karsten.scheibe @dlr.de, Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Einrichtung optische Informationssysteme, Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin

⁵ Dr. Sergej Sujew, e-mail: sergej.sujew @dlr.de, Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Einrichtung optische Informationssysteme, Institut für Verkehrsforschung, Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin

⁶ Tim Bodenmüller, e-mail: tim.bodenmueller@dlr.de, Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Robotik und Mechatronik, Münchnerstr. 20, 82234 Oberpfaffenhofen

⁷ Michael Suppa, e-mail: michael.suppa@dlr.de, Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Robotik und Mechatronik, Münchnerstr. 20, 82234 Oberpfaffenhofen

2. Rotationsbewegung

Bei einer Rotationsbewegung arbeitet die CCD-Zeilenkamera als Panoramakamera. Durch äußere Impulse wurde diese Rotationsbewegung gestört. In Abbildung 4 ist der Messaufbau wiedergegeben.

2.1. Mathematisches Modell

Das verwendete mathematische Modell für die Bildkorrektur ist in Gleichung (1) wiedergegeben. Der durch die gestörte Rotationsbewegung zu korrigierende Bildvektor steht auf der rechten Seite der Gleichung, während die Bildkoordinaten, i' , j' , des korrigierten Bildes auf der linken Seite der Gleichung, nach Transformation in einen idealen Zylinder, bestimmt werden können.

$$\begin{pmatrix} f \cdot \sin(j' \cdot \Delta\varphi') \\ i' \cdot \delta \\ -f \cdot \cos(j' \cdot \Delta\varphi') \end{pmatrix} = \lambda \cdot A(\gamma, \vartheta, j \cdot \Delta\varphi) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ i \cdot \delta \\ -f \end{pmatrix} \quad (1)$$

dabei sind:

- f = Brennweite
- i', j' = Koordinaten des korrigierten Bildes
- i, j = Koordinaten des gestörten Bildes
- δ = Pixelgröße der CCD- Zeile
- $\Delta\varphi$ = Winkelinkrement der Rotation um die y-Achse
- $\Delta\varphi'$ = instantaneous field of view (IFOV)
- γ = Rotationswinkel um die z-Achse
- ϑ = Rotationswinkel um die x-Achse

Die Berechnung der Koordinaten des korrigierten Bildes wird in den Gleichungen (2) und (3) angegeben.

$$j' = \frac{\arctan\left(\frac{a}{c}\right)}{\Delta\varphi} \quad (2)$$

$$i' = \frac{f \cdot \sin(j' \cdot \Delta\varphi)}{\delta} \cdot \frac{b}{a} \quad (3)$$

wobei:

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = A(\gamma, \vartheta, j \cdot \Delta\varphi) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ i \cdot \delta \\ -f \end{pmatrix} \quad (4)$$

ist.

2.2. Resultate



Abb. 2: Original Aufnahme (links) und korrigiertes Bild (rechts)

Die Drehbewegung der Panoramakamera wurde durch äußere Impulse gestört. In einem 5° Bildausschnitt des Panoramas sind diese Störungen sichtbar (Abb. 1). Bei einer Brennweite von 45 mm, einer Belichtungszeit von 10 ms und 32 arcsec Winkelauflösung pro Pixel (IFOV) zeigt Abb. 3 die gemessenen Störgrößen. Die Taktrate der Lagemessungen erfolgte mit 200 Hz. Die Anwendung von Gleichung (2) und (3) lieferten das in Abb. 2 zu sehende korrigierte Bild.

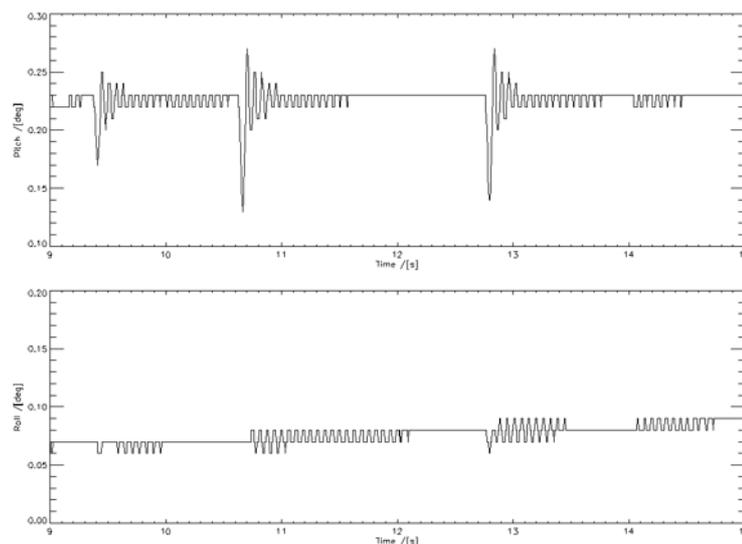


Abb. 3: Störgrößen, γ , ϑ

2.3. Bewertung

Der nach der Korrektur verbleibende Restfehler beträgt \pm ein Pixel. Eine höhere Genauigkeit war vor allen deshalb nicht erreichbar, weil das verwendete Lagemesssystem nicht für reine Rotationsbewegungen konzipiert ist. Eine Initialisierung war, wie vergleichsweise im Flugzeug, nicht möglich. Darüber hinaus ist die Winkelauflösung des Applanix Systems mit 36 arcsec im Bereich der Kamera. Dennoch war eine Nutation der Drehachse qualitativ nachweisbar.

Translationsbewegung

Diesem Teilexperiment wurden die Erfahrungen des Flugzeugeinsatzes von CCD-Zeilenkameras berücksichtigt (BÖRNER ,et al 1997). In (REULKE ,et al 2003) wurde demonstriert, wie diese in Verbindung mit inertialen Messsystemen im Nahbereich eingesetzt werden können. Die experimentelle Anordnung ist in Abb. 4 wiedergegeben. Auf dem Dach eines Fahrzeuges wurden die Kamera und die Bestandteile des inertialen Messsystems angebracht.

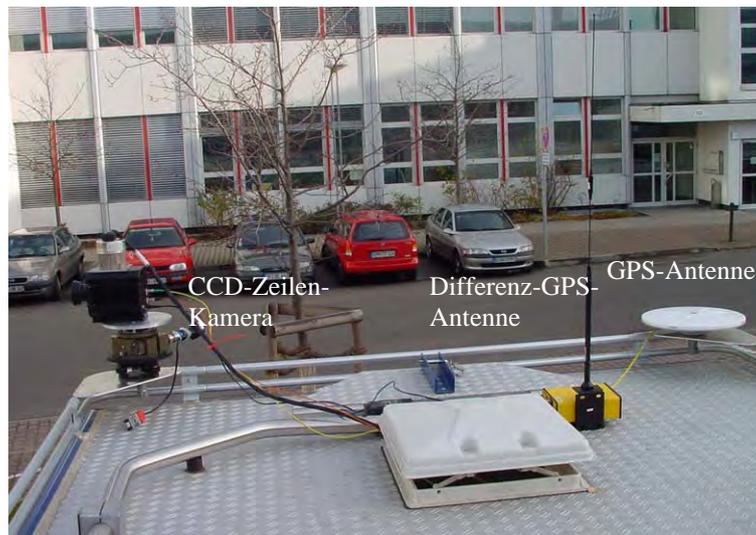


Abb. 4: Messaufbau

Die Messtrajektorie betrug ca. 100 m. Sie ist mit den dabei gemessenen Winkelbewegungen der Kamera in Abb. 5 graphisch dargestellt.

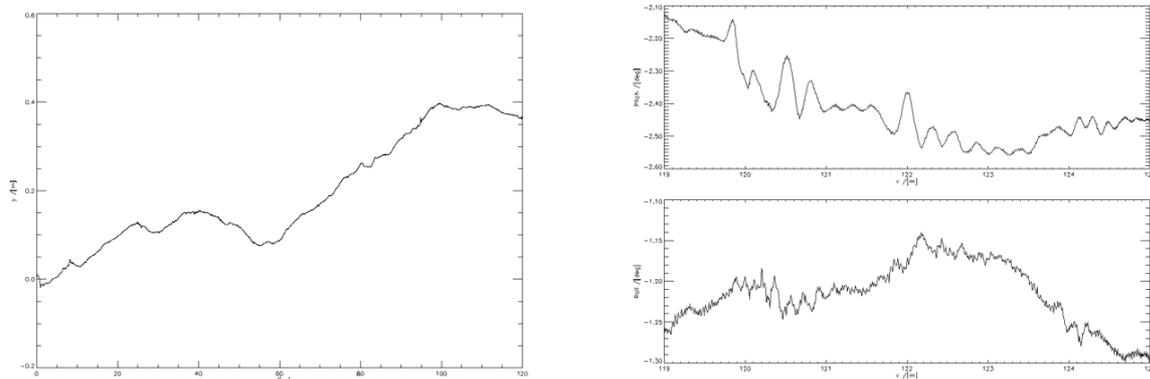


Abb. 5: Trajektorie (links) und Störgrößen, γ , φ (rechts)

Ein Detail des Gesamtbildes (Abb. 6, links) zeigt ihren störenden Einfluss bei der scannenden Bildaufnahme. Entsprechend den Standardverfahren der Fluglagekorrektur (BÖRNER ,et al 1997) wird das Originalbild korrigiert. Abb. 6 (rechts) zeigt das Ergebnis dieser Korrektur. Während in Abb. 1 ein Übersichtsbild gezeigt wird, die volle Bilddimension beträgt für jede Farbe 10296 x 85300 Bildpunkte. Im Vergleich zum Einsatz des inertialen Messsystems bei der Rotationsbewegung, konnte bei der Translationsbewegung eine höhere Genauigkeit (unter einem Pixel) erreicht werden. Die Initialisierung des Systems ist dafür verantwortlich. Die absolute Positioniergenauigkeit entlang der Trajektorie betrug ca. 6 cm.



Abb. 6: Original Aufnahme (links) und korrigiertes Bild (rechts)

2.4. Stereofähigkeit einer RGB Zeile

Die in der Bildebene der Kamera befindliche RGB Zeile weist zwischen den einzelnen Farbzeilen einen Abstand von 0,154 mm auf. Bei einer Brennweite von 45 mm besteht somit zwischen den einzelnen Farbzeilen der RGB-CCD ein Stereowinkel von 0.3669° . Zur Berechnung entsprechender Parallaxen wird Gleichung (5) benutzt.

$$p = \frac{2 \cdot \Delta}{\delta} \cdot \frac{h}{h_0} \quad (5)$$

wobei:

p = Parallaxe [in Pixel]

h = Abstand zwischen Kamera und abgebildeten Objektpunkt

h₀ = Abstand zwischen Kamera und der Projektions- (Korrektur) Ebene

δ = Abstand zwischen den Farbzeilen

d = Pixelgröße der CCD Zeile

Für ein Objektabstandsintervall von 10 m bis 100 m und einer angenommenen Projektionsebene in 10 m Entfernung ergeben sich Parallaxen größer 10 Pixel. Dies wird mittels eines Anaglyphenbildes in Abb. 7 (links) visualisiert. Betrachtet man den grünen und roten Kanal des Bildes als Stereobildpaar und nutzt ein Stereomatchingverfahren, so kann man eine 3D Auswertung vornehmen. In Abb. 7 (rechts) wird eine ermittelte Parallaxenkarte, die Falschfarben codiert wurde, dargestellt.



Abb. 7: Anaglyphen Bild (links) und Parallaxenbild (rechts)

2.5. Innenraumeinsatz

In Innenräumen wäre der Einsatz hochauflösender Zeilenscanner, speziell in Verbindung mit einer Translationsbewegung, ebenfalls bei der Digitalisierung von Kunstgegenständen und Räumen von Interesse. Die in oben beschriebene Messanordnung ist aber wegen der fehlenden GPS Signale in Innenräumen nicht anwendbar. Hier ließe sich an die Erfahrungen in der Robotik anknüpfen (SUPPA, HIRZINGER, 2004). Zu diesem Zwecke wurde in einem ersten Versuch ein Tracking System der Firma Advanced Realtime Tracking GmbH benutzt. Diese besteht aus vier im Infraroten empfindlichen Kameras, die jeweils mit einer Infrarotlichtquelle versehen sind. Kugeln, die in einer festen geometrischen Ordnung zueinander angebracht sind, reflektieren die Infrarotstrahlung. Die dadurch in den Kameras entstehenden Bilder sind die Grundlage für das Tracking des mit den Kugeln starr verbundenen Körpers. Abb. 9 zeigt die Konfiguration der Tracking Kugeln mit der Kamera sowie die gemessenen Winkel im Laborkoordinatensystem, die infolge einer reinen Rotation der Kamera gemessen wurden. Die Winkelgenauigkeit betrug ca. 5 Pixel. Unter Verwendung des Heading Winkel wurde ein Panoramabild von ungefähr 22° auf eine Referenzebene korrigiert. Abbildung (?) zeigt das Ausgangsbild und das Ergebnis dieser Korrektur. Die Korrektur entspricht der Transformation von Zylinderkoordinaten in Kartesische Koordinaten.

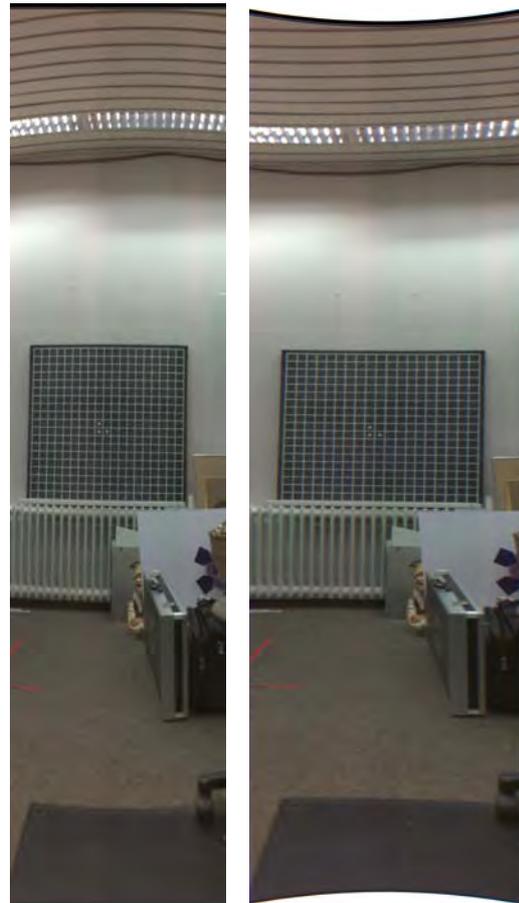


Abb. 8:
Korrektur der Rotationsbewegung

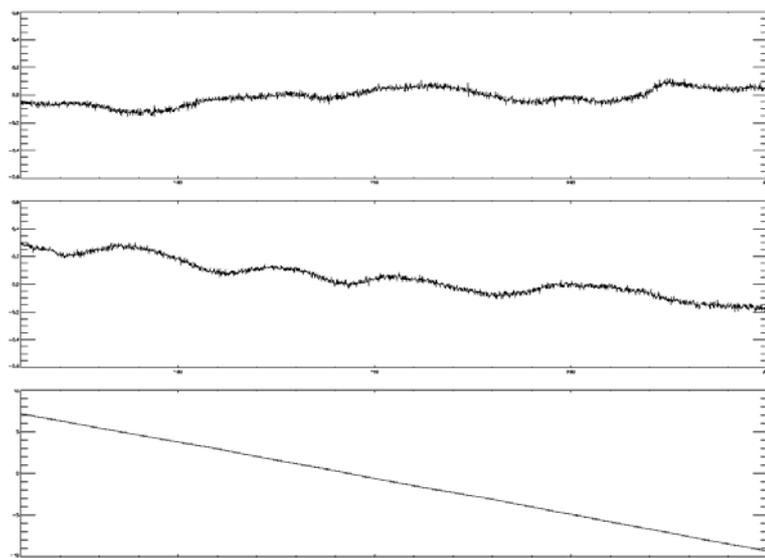
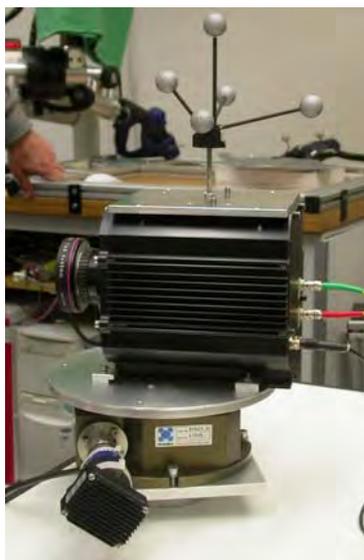


Abb. 9: Messanordnung (links), gemessene Winkel im Laborkoordinatensystem (rechts)

3. Zusammenfassung

Ein gekoppeltes System von CCD-Zeilenkamera und einem inertialen Messsystem ermöglicht die Bildaufnahme, speziell ausgedehnter Objekte, wie z.B. Fassadenfronten. RGB Zeilen weisen im Nahbereich Stereofähigkeit auf, die für eine 3D Auswertung genutzt werden kann. Von praktischem Interesse wird diese Bildmesskonfiguration beim Einsatz miniaturisierter inertialer Messsysteme, die auch im statischen Fall, gemeint ohne Translationsbewegung, in Innenräumen eingesetzt werden kann. Das Tracken einer CCD Zeilenkamera in Innenraumbereichen ist ein vielversprechender Ansatz, der in der Robotik sich bereits bewährt hat. Die Trackinggenauigkeit muss noch der Winkelauflösung der hochauflösenden CCD-Zeilen-kameras angepasst werden.

4. Literaturverzeichnis

- 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, pp. 77-83
- BÖRNER A., REULKE R., SCHEELE M., TERZIBASCHIAN T.: Stereo Processing of Image Data from an Airborne Three Line CCD Scanner, Proceedings of the Third International Airborn Remote Sensing Conference and Exhibition, Vol. I, pp. 423 - 430, Copenhagen, 1997
- REULKE, R., WEHR, A., KLETTE, R., SCHEELE, M., SCHEIBE, K.: Panoramic Mapping using CCD-Line Camera and Laser Scanner with Integrated Position and Orientation System, IVCNZ2003, Palmerston North, pp. 72 –77
- SUPPA, M., HIRZINGER, G.: A Novel System Approach to Multisensory Data Acquisition, The 8th Conference on Intelligent Autonomous Systems IAS-8, Amsterdam, The Netherlands, 2004.

Untersuchungen zu einem flugzeugbasierten Digitalkamera-System mit direkter Sensororientierung

CHRISTIAN MULSOW¹, DIRK HANNUSCH²

Zusammenfassung: Am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) an der TU Dresden wurde im Rahmen eines Projektes mit der MILAN Flug GmbH ein flugzeugbasiertes RGB-Digitalkamera-System mit direkter Sensororientierung hinsichtlich seiner Genauigkeit und Nutzbarkeit zur Orthophotogenerierung untersucht. Als Bildsensor im System fungiert ein Rollei-Metric 6008 Body mit einem 4k x 4k Digitalrückteil, welcher gegenüber anderen Luftbildsystemen eine low-cost Variante darstellt. Die Informationen über die jeweilige Bildorientierung werden durch das AEROcontrol-System der IGI mbH bereitgestellt. Zur korrekten direkten Kameraorientierung ist eine integrierte Systemkalibrierung notwendig. Als Kalibrierparameter werden dabei unter anderem die Fehlausrichtung zwischen dem Bildsensor und dem IMU spezifischen Körpersystem (Boresight Alignment) bestimmt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde anhand von verschiedenen Datensätzen neben der Güte der Bestimmbarkeit der Fehlausrichtung ebenfalls die Langzeitstabilität der Kalibrierparameter untersucht. Zur Beurteilung der Qualität der direkten Georeferenzierung wurden ermittelte Objektkoordinaten mit den Ergebnissen aus einer passpunktbasierten automatischen Aerotriangulation exemplarisch verglichen. Die praktische Nutzbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse konnte im Rahmen einer Orthophotogenerierung unter Beweis gestellt werden.

1 Einleitung

Ein wesentlicher Schritt bei der Rekonstruktion räumlicher Objekte auf der Basis von Bildaufnahmen ist die relative und die absolute Sensororientierung. Diese wird in der klassischen Luftbildphotogrammetrie über eine Aerotriangulation bewerkstelligt. Fortschritte und Innovationen auf dem Gebiet der bildgebenden Sensoren (digitale Zeilen-Kameras, Laserscanner) führten zu einem Bedarf an Technologien zur direkten Bestimmung der Orientierungsdaten des jeweiligen Sensors zum Aufnahmezeitpunkt, da klassische Orientierungsverfahren der Photogrammetrie auf Grund der spezifischen Sensorcharakteristik nicht zum Tragen kommen. Dieser Bedarf kann im Bereich der luftgestützten Sensoren durch integrierte GPS-Inertial Systeme mit ausreichender Genauigkeit und Zuverlässigkeit abgedeckt werden. Derartige Systeme sind in der Praxis bereits seit mehreren Jahren im Einsatz. Bisher werden integrierte Gesamtsysteme hauptsächlich mit einem Pushbroom-Sensor betrieben, da hier eine direkte Sensororientierung unabdingbar ist. Die Verwendung von GPS/IMU Einheiten zur Orientierung von Flächensensoren ist ebenfalls möglich, ist aber aufgrund der hohen Beschaffungskosten nicht sehr verbreitet. Derartige Kombinationen eröffnen dem Anwender eine Reihe von Möglichkeiten zur signifikanten Erhöhung des Automatisierungsgrades und der Geschwindigkeit der Auswertung. Gerade für Firmen, welche schon im Besitz eines GPS/IMU- Systems sind (z.B. Firmen im Bereich Airborne-Laserscanning), bietet sich die Möglichkeit der Integration eines weiteren Sensors an, um parallel zur Akquisition des Oberflächenmodells Bilder des beflogenen Gebietes zur Orthobilderzeugung aufzunehmen. Aus dieser Überlegung heraus erweiterte die Milan Flug GmbH ihr luftgestütztes System aus ei-

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

² Dipl. Ing. Dirk Hannusch, Milan Flug GmbH, Schäfereistraße 24, 03130 Spremberg,
e-mail: d.hannusch@milan-flug.de

nem Riegl-Laserscanner und einer GPS-IMU Einheit der Fa. IGI mbH um eine Rollei Metric Kamera mit digitalem Rückteil. In dieser Konfiguration wurde im Oktober 2003 ein Gebiet von ca. 10 km x 20 km in der Lausitz aufgenommen.

Im Rahmen einer Pilotstudie zur Erstellung eines operationellen Ablaufplanes zur Orthobilderzeugung auf der Grundlage der GPS/IMU-Aufzeichnungen sowie Scan- und Bilddaten ist das Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung an der TU Dresden von der Milan Flug GmbH als Kooperationspartner beratend hinzugezogen worden. Wesentliche Inhalte des Projektes waren die Bestimmung des Boresight Alignment zu jedem Flugtag sowie eine Abschätzung der zu erwartenden Genauigkeiten in den Orthobildern. Auf diese Punkte wird in diesem Artikel ein besonderes Gewicht gelegt.

2 Technischer Aufbau und Datenakquisition

Im Rahmen des oben angesprochenen Orthophotoprojektes wurde das bereits seit einiger Zeit bei der Milan Flug GmbH im Einsatz befindliche System aus einem Riegel ESS 800-15 Laserscanner und einer GPS/IMU Einheit AEROCtrl-IIId der Firma IGI mbH um eine Rollei Digitalkamera erweitert. Diese bildgebende Sensoreinheit besteht aus einem Rollei Metric 6008-Body und einem 4k x 4k -Digitalrückteil (4096 x 4096 Pixel). Als Optik wurde ein 50mm Objektiv verwendet, woraus bei einer Sensorgröße von 36mm x 36mm ein Öffnungswinkel von 50 gon resultiert.



Abb. 1: Aufbau mit Laserscanner, IMU-Einheit und Kamera (Abb. Kamera Rollei-Prospekt)

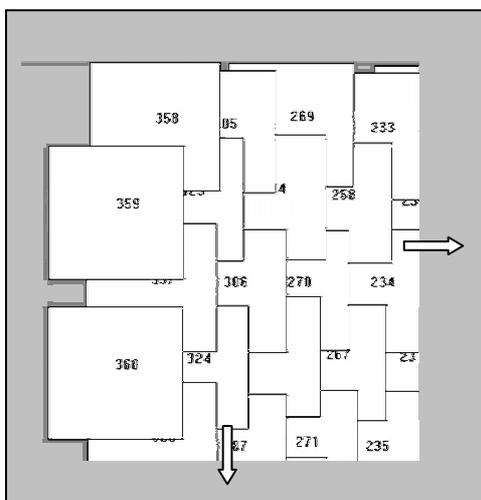


Abb. 2: Aufnahmemuster für die Orthobilderzeugung

Als problematisch stellte sich die geringe Speicherrate von bestenfalls 3sec/Bild heraus (praktisch erreichte Bildrate 4,5sec/Bild). Aus diesem Grunde war es nicht möglich, ein klassisches Streifenmuster mit in Flugrichtung überlappenden Aufnahmen bei einer Flugeschwindigkeit von ~60 m/s sowie einer durch den Bildmaßstab und die Scanner-Reichweite vorgegebenen Flughöhe über Grund von 600m zu realisieren. Es wurde daher, wie in Abb.2 verdeutlicht, der Bildverband zur Orthobilderzeugung in einer Art Reißverschluss-Muster aufgenommen. Damit konnte eine lückenlose Aufnahme des Gebietes erreicht werden. Für ein Boresight Alignment zur Bestimmung der Fehlansrichtung der IMU-Einheit zur Kamera auf Basis einer Bündelblockausgleichung hingegen ist diese Konfiguration des Bildverbands ungenügend. Als Abhilfe wurde daher ein Testfeld mehrmals befliegen, um Bildstreifen mit gegenseitiger Überlappung von 60-70% zu simulieren. Untenstehende Abb. 3 mit Flugtrajektorien und Bildnummern verdeutlicht dieses Aufnahmeschema. Als Testfeld fungierte der Flugplatz Kamenz, auf welchem 23 signalisierte Passpunkte mit übergeordneter Genauigkeit via GPS und Totalstation zuvor aufgemessen wurden.

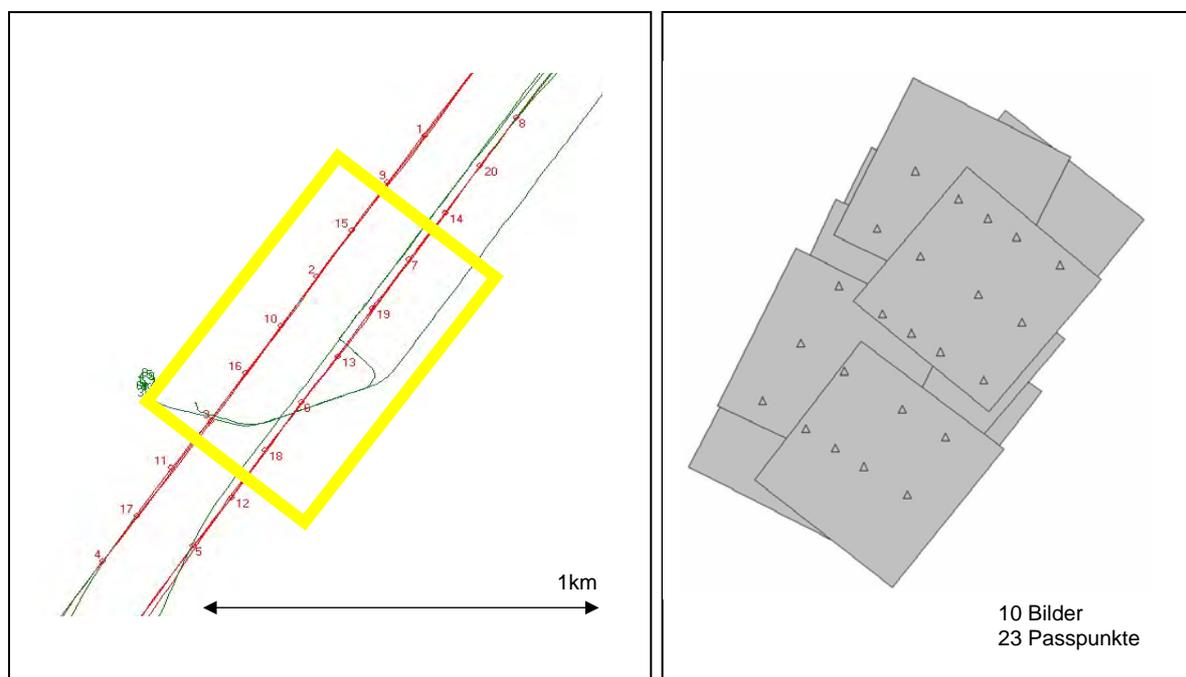


Abb. 3: Testfeldbefliegung; Flugstreifen- und Passpunktanordnung

Die Aufnahmekonfiguration war bei den drei durchgeführten Testfeldbefliegungen identisch. Leider wurden keine Querstreifen über dem Feld aufgenommen, womit eine Möglichkeit zur Minderung von etwaigen Korrelationen zwischen den unbekanntem Parametern ausgelassen wurde. Der Bildmaßstab betrug in allen Aufnahmen ca. 1:12000, womit mit einer Bodenauflösung von ~ 11 cm erreicht wurde.

Die aufgezeichneten GPS/IMU Daten wurden von der IGI Auswertesoftware aufbereitet und in Form eines patb-Files dem weiteren Auswerteprozess zur Verfügung gestellt. Dabei werden an den GPS-Koordinaten Korrekturen zur Kompensation der Exzentrizität zwischen GPS-Empfänger und Kamera angebracht und die Orientierungen des Körpersystems (IMU) über Hebelarmkorrekturen und Umrechnungen in photogrammetrische Winkel (Omega, Phi, Kappa) überführt (für eine ausführliche Darstellung siehe auch (BÄUMKER 2001)). Die Fa. IGI mbH gibt für die AEROcontrol-IIid Einheit eine Standardabweichung der Zentrumskoordinaten von 0.1m an. Die Orientierung kann mit einer Genauigkeit von 0.005/0.005/0.01 Grad für Omega/Phi/Kappa bestimmt werden. Diese Werte wurden in Tests am IFP der Universität Stuttgart bestätigt (CRAMER 2003) und sogar übertroffen. A priori lässt sich daraus

für dieses System und die Aufnahmeconfiguration eine theoretische Referenzierungsgenauigkeit für Bodenpunkte von besser als 0.2m in der Lage ableiten.

3 Kalibrierung - Bore sight Alignment

Die gemeinsam prozessierten GPS und IMU Daten enthalten die zeitlich referenzierten Informationen über die Lage der GPS/IMU Einheit während des Bildfluges. Durch eine zeitliche Taktung können Bild- und GPS/IMU-Daten temporal zu einander referenziert werden. Die Position und die Ausrichtung GPS/IMU Einheit muss nun in einen räumlichen Bezug zur Kamera gebracht werden. Die Offsetvektoren zwischen Kamera und GPS/IMU Einheit wurden vorab durch einfaches Ausmessen am Boden bestimmt. Für die genaue Bestimmung der Ausrichtung zwischen IMU und Kamera hingegen ist eine Kalibrierung über eine Aerotriangulation unumgänglich. Der ebenfalls im System integrierte Laserscanner wird im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet. Da beim Einbau auf eine möglichst parallel zur IMU-Einheit ausgerichtete Montage der Kamera geachtet wurde, sind die zu bestimmenden Winkelbeträge der Fehlausrichtung kleiner als 5 gon.

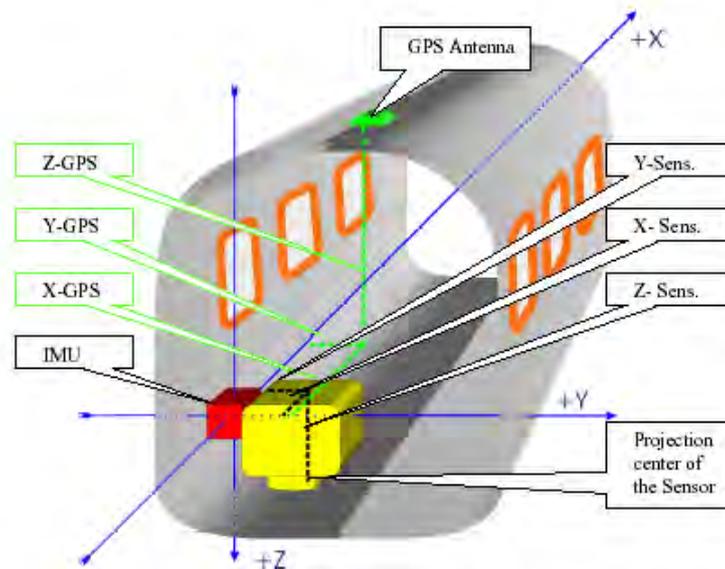


Abb. 4: Exzentrizitäten und Ausrichtungen zwischen den verschiedenen Systemkomponenten (IGI AEROcontrol-III Handbuch)

Die analytische Bestimmung der Offsetwinkel wurde an der TU-Dresden mit den Programmen Leica Photogrammetry Suite (LPS) und ORIMA durchgeführt. Zunächst wurden die Bilder des Kalibrierfluges in LPS ausgewertet. Dieser Prozess umfasste die Bildpunktmesung der Passpunkte, die automatische Messung von Verknüpfungspunkten sowie eine Vorab-Triangulation der Bilder und diente der Schaffung der Voraussetzungen für die darauf folgende Bestimmung der Offsetwinkel in ORIMA. Als Eingangswerte gehen dann die GPS/IMU Daten, die Bildpunktmessungen und die Kameraparameter in die Ausgleichung in ORIMA ein. Der Parameterumfang für die Bündelblockausgleichung kann in ORIMA optional um die gesuchten Offsetwinkel erweitert werden. Nicht berücksichtigt wurden Parameter für eventuelle Fehler in den Offsetbeträgen (Hebelarm) zwischen IMU und Kameraprojektionszentrum, um die Lösung zu stabilisieren und Korrelationen zu minimieren. Es kann davon ausgegangen werden, dass dieser kurze Hebelarm bei der Systeminitialisierung messtech-

nisch hinreichend genau bestimmt werden konnte. Auf Grund von Dateninkonsistenzen in den Passpunktkoordinaten und GPS-Daten wurden als zusätzliche Unbekannte zunächst Parameter für eine Datumstransformation der GPS-Projektionszentren (ohne Systemrotationen) in die Berechnung eingeführt. Nachdem für alle drei Testfeldbefliegungen die Winkelfehlbeiträge und die Datums-Translation ermittelt wurden, erfolgte eine Mittelung der Transformationsparameterwerte. Diese Beträge wurden dann a priori an den GPS-Zentren angebracht und abermalig die Berechnung der Winkelfehlbeiträge durchgeführt. Die Resultate sind in folgenden Diagrammen dargestellt (Abb.5).

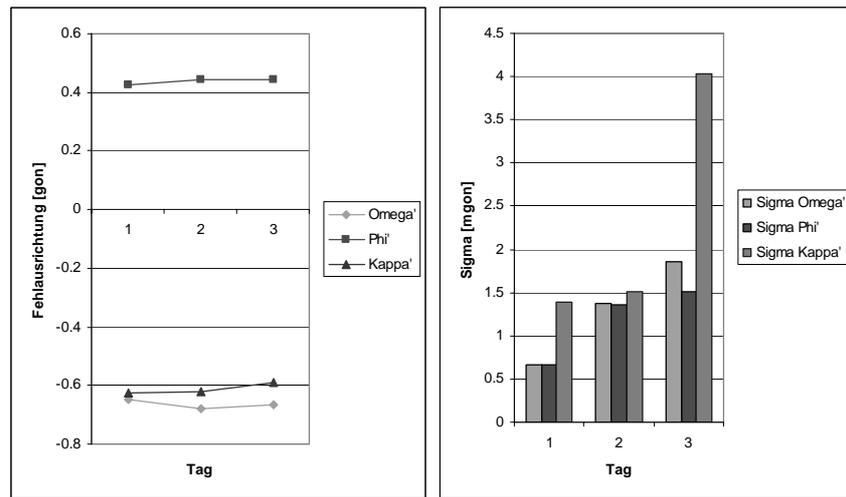


Abb. 5: Misalignment-Winkel und zugehörige Standardabweichungen

Die Beträge der jeweiligen Misalignment-Winkel unterscheiden sich signifikant voneinander (4 bis 16- fache der Standardabweichung), womit zunächst auf eine Instabilität der Ausrichtung zwischen INS und Kamera geschlossen werden kann. Eine Langzeitstabilität ist demnach nicht gegeben und damit eine Kalibrierung des Systems für jeden Aufnahmeflug erforderlich. Auffällig ist das Ansteigen der Standardabweichungen für die ausgeglichenen Parameter der Fehlausrichtung. Anscheinend sank die Güte der Daten im Laufe der Messkampagne. Dieser Fakt spiegelt sich auch in den übrigen Qualitätsparametern aus der Ausgleichung wieder (Tab.1).

	1. Tag	2. Tag	3. Tag
Sigma 0 [Pixel]	0,38	0,32	0,51
RMS Omega _{IMU} [mgon]	2,6	4,6	5,7
RMS Phi _{IMU} [mgon]	3,0	6,6	6,7
RMS Kappa _{IMU} [mgon]	6,4	11,5	31,2
RMS GPS in X [mm]	7	7	6
RMS GPS in Y [mm]	10	9	5
RMS GPS in Z [mm]	10	12	9
Sigma X _{Proj.-zentrum} [mm]	6	16	15
Sigma Y _{Proj.-zentrum} [mm]	6	16	15
Sigma Z _{Proj.-zentrum} [mm]	7	15	15

Tab. 1: Genauigkeitsangaben der Bestimmung des Boresight Alignments über erweiterte AT

Die ursächlichen Faktoren für diesen Qualitätsabfall sind zunächst nicht eindeutig lokalisierbar. Als mögliche Ursachen können Instabilitäten der Kamera angeführt werden. Es ist zu vermuten, dass durch die Beschleunigungskräfte während Start und Landung die innere Orientierung der Kamera beeinflusst wurde (Verschiebung des Hauptpunktes). Ein Indiz für die-

se Annahme ist die abnehmende Genauigkeit des Boresight Alignment mit Zunahme des zeitlichen Abstandes zum Kalibrierzeitpunkt. Eine simultane Kalibrierung der Kamera zu jedem Kalibrierflug zur Überprüfung dieses Verdachtsmomentes war aufgrund der zu diesem Zweck unzureichenden Aufnahmeconfiguration nicht realisierbar, sollte aber für zukünftige Projekte vorgesehen werden.

Zur Überprüfung der berechneten Beträge der Fehlausrichtung und zur Beurteilung der Brauchbarkeit der Daten zur Orthophotoproduktion wurden die IMU-Orientierungswinkel um den Winkeloffset verbessert und abermalig eine Bündelausgleichung mit fixierten (verbesserten) Zentrumskoordinaten und Orientierungen gerechnet. Die auftretenden Restklaffungen an den Passpunktkoordinaten können nun als Maß für die Beurteilung der Güte der direkten Georeferenzierung herangezogen werden.

Tag	Restklaffung in X [m]	Restklaffung in Y [m]	Restklaffung in Z [m]	Sigma x [Pixel]	Sigma y [Pixel]
1	0,04	0,04	0,21	0,64	0,68
2	0,06	0,06	0,32	0,66	0,84
3	0,06	0,14	0,28	0,73	0,98

Tab.2 Restklaffungen der Passpunkte nach erfolgter Bündelausgleichung mit fixierten und verbesserten GPS-Zentren und Orientierungen, Standardabweichungen der Bildpunktkoordinaten der Passpunkte

Wie aus Tab. 2 ersichtlich kann auch hier ein Abfallen der Güte der Referenzierung mit fortschreitender Dauer der Messkampagne beobachtet werden. Auffällig ist die signifikante Zunahme der Restklaffung an den Bildkoordinaten der Passpunkte in y-Richtung, welche in diesem Fall in Flugrichtung orientiert ist. Hier kann ein weiteres Indiz für die Theorie der instabilen Kamera erkannt werden, da die oben angesprochenen Beschleunigungskräfte primär in Flugrichtung wirken.

Die Lagegenauigkeit der Georeferenzierung kann bei als fehlerfrei angenommener Höhenreferenz mit 6cm für den 1. Tag, mit 8cm für den 2. Tag sowie mit 15cm für den 3. Tag abgeschätzt werden und war damit jedenfalls ausreichend für die vom Auftraggeber geforderte Genauigkeit von 20cm (gemäß Anforderungen ALK). Die abgeschätzte Lagegenauigkeit entspricht den Herstellerangaben und den Erwartungen an das System.

4 Orthophotogenerierung

Das primäre Ziel dieser Messkampagne war die Erzeugung von Orthophotos auf der Basis der Bilddaten und eines aus den aufgenommenen Laserscanner-Daten erzeugten Geländemodells. Sämtliche dafür notwendigen Daten konnten im Rahmen *eines* Aufnahmefluges simultan durch das integrierte GPS/IMU-Laser-Kamera-System akquiriert werden. Die Vorteile eines derartigen Systems liegen auf der Hand. Zum einen wird das GPS/IMU-System für beide bilderzeugenden Systeme genutzt und damit eine spannungsfreie Datenfusion garantiert, zum anderen können im erheblichen Maße Flugkosten und -zeiten eingespart werden. In Abb. 6 ist der Ablaufplan der Orthophotogenerierung schematisch dargestellt.

Zur Kontrolle der Güte der generierten Orthophotos wurden diese in einem Viewer georeferenziert geladen und die Überlappungsbereiche hinsichtlich Stimmigkeit visuell beurteilt. An Kanten (Straßen, Wege) kann anhand der Diskrepanzen zwischen den Bildern eine Abschätzung der Referenziergenauigkeit der Bilddaten erfolgen. Abbildung 7 zeigt exemplarisch die Randbereiche dreier einander überlappender Orthophotos.

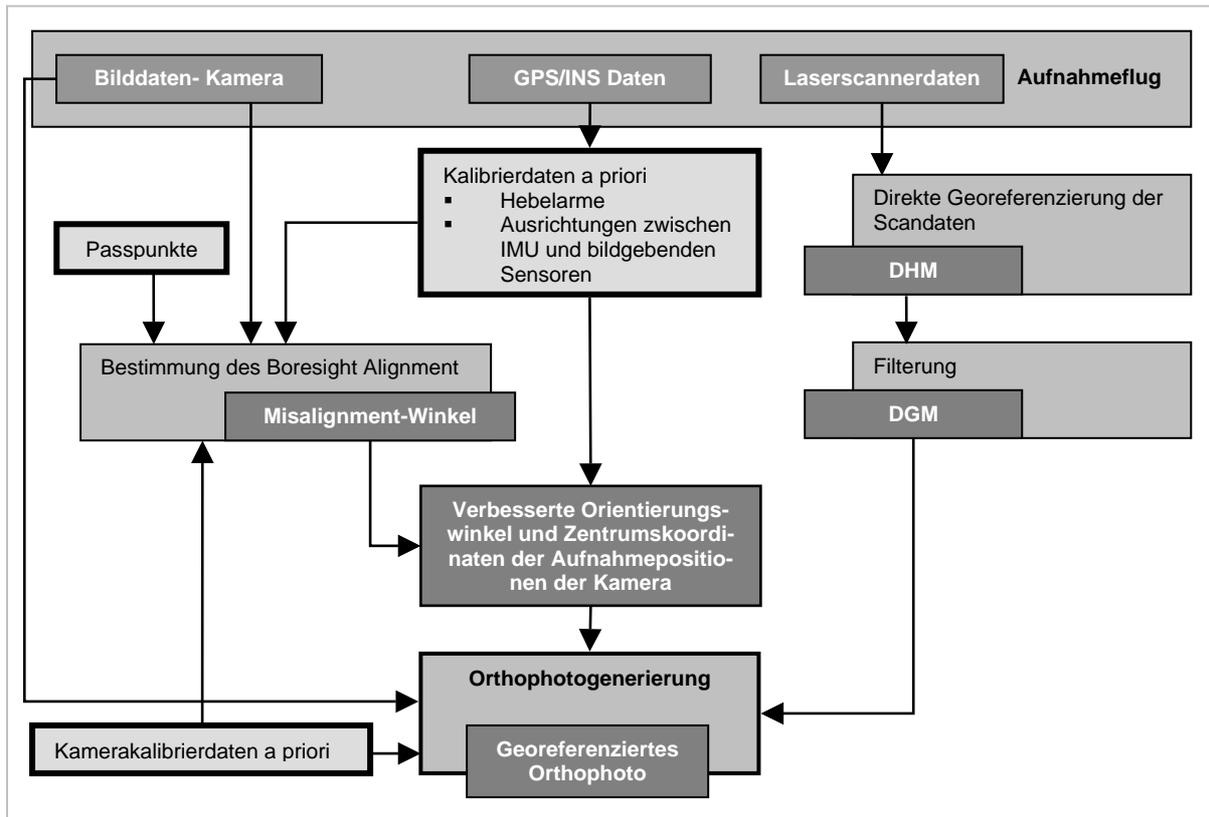


Abb. 6: Workflow & Dataflow Orthophotogenerierung



Abb. 7: Visueller Vergleich der Randbereiche dreier einander überlappender Orthophotos

Es lässt sich erkennen, dass das der Grad des „Zusammenpassens“ der Kanten nicht homogen ist. In dem Beispiel Abb. 7 laufen die Kanten der horizontal verlaufenden Straßen nahezu nahtlos ineinander über, wobei der auf diese Straße mündende Weg in den Bildern nicht deckungsgleich dargestellt wird (Diskrepanz ~ 2 Pixel bzw. ~ 20 cm). Diese geometrischen In-

korrektheiten liegen in dem a priori abgeschätzten Genauigkeitsbereich (Abschnitt 3). Die beobachtete Inhomogenität ist auch ein Indiz für ein nicht optimal modelliertes Gelände. Zum einen liegt das DGM als Meterraster vor, womit mit Interpolationsfehlern bei der differentiellen Entzerrung zu rechnen ist. Geländekanten, welche insbesondere bei Kunstbauten wie Straßen und Wegen auftreten werden zudem schon bei der Rastererstellung aus der Laser-scannerpunktwolke nur noch unzureichend repräsentiert. Als weitere Fehlerquelle bei der DGM-Erzeugung sei auch hier die Filterung benannt. Bei dem in diesem Falle großen Öffnungswinkel der Aufnahmeoptik (50 gon) kommen eben benannte Fehler im DGM besonders in den Randbereichen des Ergebnisbildes der differentiellen Entzerrung zum Tragen. Eine umfassende Kontrolle der Orthophotos durch Anmessen von Kontrollpunkten, wie in (IP 2004) beschrieben, war in diesem Falle nicht möglich, da für das eigentlichen Messgebiet keine Referenzdaten vorlagen.

5 Fazit

Flugzeugbasierte integrierte Systeme zur vollständigen geometrischen und radiometrischen Erfassung von Erdoberflächen mit der Möglichkeit zur direkten Georeferenzierung der akquirierten Daten werden aufgrund des großen Automationspotentials schon in naher Zukunft eine weite Verbreitung in der operationellen Photogrammetrie finden. Dabei können für Gebiete mit beschränkter Ausdehnung oder die Aufnahme von Korridoren „low cost“ Lösungen auf Basis eines 4k x4k Flächensensors bereits eine interessante Lösung darstellen. Wie die Ergebnisse zeigen, werden die Qualitäten einer herkömmlichen Aerotriangulation zwar noch nicht ganz erreicht, aber für die Abwicklung von Projekten, welche nicht den höchsten Genauigkeitsanforderungen genügen müssen, sind derartige Systeme im höchsten Maße interessant.

Wie die Ergebnisse zeigen, ist das Genauigkeitspotential der untersuchten Gerätekombination noch nicht ausgeschöpft, da Instabilitäten der verwendeten Kamera nicht ausgeschlossen werden konnten. Eine simultane „On the Job“ Kalibrierung oder die Verwendung einer stabileren Kamera kann hier Abhilfe schaffen.

Literaturverzeichnis

- BÄUMKER, M. & HEIMES, F.-J., 2001: Neue Kalibrations- und Rechenverfahren zur direkten Georeferenzierung von Bild- und Scannerdaten mittels der Positions- und Winkelmessungen eines hybriden Navigationssystems. In: Proceedings 11. Internationale Geodätische Woche, Obergurgl, Ötztal/Tirol, 18.-24.2.2001
- CRAMER, M., 2003: Erfahrungen mit der direkten Georeferenzierung. In: Zeitschrift Photogrammetrie - Fernerkundung – Geoinformation PFG, Ausgabe 4/2003 S.267-278
- HIMLE, S., 2001: Sensor integration and data fusion in praxis. In: Photogrammetric Week 01, 2001, S.239- 247
- IP, A. ET AL, 2004: Orthophoto Production Using Directly Georeferenced Digital Images. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, März 2004, S. 261/262

Die ersten Blätter des neuen Kartenwerks „Topographic Image Map Mars 1:200 000“

JÖRG ALBERTZ¹, STEPHAN GEHRKE¹, HARTMUT LEHMANN¹, TINO SCHUMACHER¹,
GERHARD NEUKUM² und das HRSC Co-INVESTIGATOR TEAM

Zusammenfassung: Die „High Resolution Stereo Camera“ (HRSC) an Bord der europäischen Mars Express Mission liefert seit Januar 2004 dreidimensionale, multispektrale Bilddaten vom Mars. Diese bilden unter anderem die Grundlage für qualitativ hochwertige Kartenprodukte der Mars-Oberfläche, allen voran das großmaßstäbige Kartenwerk „Topographic Image Map Mars 1:200 000“. An der Technischen Universität Berlin wurden in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) bereits die ersten Blätter dieses Kartenwerkes auf der Basis von HRSC-Orthobildmosaikern generiert. Die Kartenherstellung erfolgt weitestgehend automatisch; den zentralen Teil der Prozesskette bildet das an der TU Berlin entwickelte Softwarepaket „Planetary Image Mapper“ (PIMap).

1 Einleitung

ESA's Mars Express ist eine von insgesamt fünf verschiedenen Missionen, die zurzeit auf der Oberfläche unseres Nachbarplaneten bzw. in dessen Orbit arbeiten. An Bord des Mars Express Orbiters befindet sich das *High Resolution Stereo Camera* (HRSC) Experiment, welches speziell unter photogrammetrischen und kartographischen Gesichtspunkten konzipiert worden ist. Seit Januar 2004 liefert die Kamera multispektrale Stereo-Daten der Mars-Oberfläche, die Wissenschaft und Öffentlichkeit gleichermaßen begeistern. Principal Investigator des Experiments ist Prof. GERHARD NEUKUM von der FU Berlin.

HRSC-Bildstreifen werden in nahezu polaren Orbits mit einer Auflösung von 10-20 m/Pixel aufgenommen. Die kleinste Streifenbreite beträgt damit etwa 60 km, während die Längen je nach Aufnahmekonfiguration, Übertragungsrate und Zielgebiet stark schwanken und durchaus einige 1000 km erreichen können (NEUKUM et al., 2004).

Die Datenprozessierung umfasst die systematische geometrische und radiometrische Korrekturen der Originaldaten sowie die photogrammetrische Auswertung bis hin zur Ableitung Digitaler Geländemodelle (DGMs) und Orthobildmosaikern als Basisdaten der hier vorgestellten kartographischen Produkte und wird innerhalb des HRSC Co-Investigator Teams ausgeführt. Erste Erfahrungen mit den HRSC-Daten und ihrer Prozessierung legen OBERST et al. (2004) dar.

Das Standardkartenwerk der Mars Express Mission ist die *Topographic Image Map Mars 1:200 000*. Sie stellt darüber hinaus auch den Rahmen für abgeleitete Produkte, z.B. Karten größerer Maßstäbe, sowie für die zukünftige topographische und thematische Kartographie

¹ Technische Universität Berlin, Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik, Sekretariat EB9, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin, E-Mail: {albertz | stephan | hartmut | tino}@fpk.tu-berlin.de

² Freie Universität Berlin, Institut für Geologische Wissenschaften, Malteserstr. 74-100, 12249 Berlin, E-Mail: gneukum@zedat.fu-berlin.de

dar (ALBERTZ et al., 2004). Für die automatisierte Kartenherstellung wurde an der TU Berlin das Software-Paket *Planetary Image Mapper* (PIMap) entwickelt. Ausgehend von sehr detaillierten Benutzervorgaben können mittels PIMap sämtliche Bestandteile einer Karte automatisch generiert und zum digitalen Blatt zusammengefügt werden. Diese Vorgehensweise stellt einen bedeutenden Fortschritt innerhalb der planetaren Kartographie dar.

An der TU Berlin wurden in Zusammenarbeit mit dem DLR bereits erste Kartenprodukte der Mars-Oberfläche erstellt. Auf Grundlage der von der HRSC aufgenommenen Bilder wurden seit Januar 2004 – angepasst an die jeweilige Lage der Bildstreifen – Sonderblätter wissenschaftlich interessanter Gebiete angefertigt (vgl. ALBERTZ et al., 2004). Im Zuge der ständig wachsenden Abdeckung des Planeten bestehen mehr und mehr Möglichkeiten, Mosaik aus sich überlappenden Streifen zu bilden. Auf dieser Basis liegen nunmehr die ersten Karten innerhalb des Regelblattschnitts der *Topographic Image Map Mars 1:200 000* vor.

2 Das kartographische Konzept

Die kartographischen Grundlagen – geodätische Bezugsflächen des Planeten Mars, Kartenprojektionen, usw. – sind im Folgenden zusammenfassend beschrieben. Details können GEHRKE et al. (2003b) und ALBERTZ et al. (2004) entnommen werden.

2.1 Bezugssysteme und Kartenprojektionen

Der Lagebezug auf dem Mars wird durch ein Rotationsellipsoid beschrieben, welches im Massenzentrum gelagert ist. Nach Definition durch die Internationale Astronomische Union (IAU) beträgt die Länge der äquatorialen Halbachse 3396,19 km, die der polaren Halbachse 3376,20 km. Diese Parameter des *Mars IAU 2000* Ellipsoides wurden im Jahr 2003 bestätigt (SEIDELMANN et al., 2002, SEIDELMANN et al., 2004). Planetozentrische Breiten in Kombination mit östlich positiv gezählten Längen bilden das Referenzsystem auf der Mars-Oberfläche; der Nullmeridian ist durch den Krater Airy-0 festgelegt.

Für den Höhenbezug auf dem Mars ist eine Äquipotentialfläche, das so genannte Areoid, definiert (Seidelmann et al., 2004).

Das Kartenwerk *Topographic Image Map Mars 1:200 000* basiert auf flächentreuen Kartenprojektionen. Für Blätter zwischen 85° südlicher und nördlicher Breite wird die Sinusoidalprojektion, für die Polbereiche die Azimutal-Abbildung nach Lambert angewendet.

2.2 Das Kartenwerk *Topographic Image Map Mars 1:200 000*

Die Grundkonzepte der *Topographic Image Map Mars 1:200 000* wurden bereits für die fehlgeschlagene Mars96 Mission mit dem Ziel definiert, eine optimale Darstellung der Mars-Oberfläche zu ermöglichen (LEHMANN et al., 1997). Sie stellt mit entsprechenden Anpassungen wie beispielsweise der Übernahme aktueller Definitionen der Referenzsysteme auch den Standard für Mars Express dar. Die bestehende Bandbreite von Karten kleiner und mittlerer Maßstäbe wird durch die *Topographic Image Map Mars 1:200 000* um das benötigte großmaßstäbige Kartenwerk ergänzt. Damit sind folgende Maßstäbe bzw. Kartenwerke für den Mars in Gebrauch (ALBERTZ et al., 2004):

- Globale Karten, im Wesentlichen in 1:25 Mill. (25M) und 1:15 Mill. (15M)

- Kartenwerke *Mars Charts* MC 5M und MC 2M
- Karten mittlerer Maßstäbe (1M)
- Kartenwerk *Mars Transverse Mercator* MTM 500k
- *Topographic Image Map Mars 1:200 000* (200k) und daraus abgeleitete großmaßstäbige Produkte (100k, 50k)

Während den meisten dieser Karten konforme Projektionen – Mercator, Lambertsche Kegelprojektion bzw. Stereographische Projektion – zu Grunde liegen, ist die *Topographic Image Map Mars 1:200 000* flächentreu (s.o.). Die Sinusoidalprojektion wird dabei für jedes Kartenblatt mit einem eigenen Bezugsmeridian, welcher der Blattmitte entspricht, ausgeführt. Damit verfügt jedes dieser Blätter über individuelle Projektionsparameter, so dass insbesondere in Anbetracht des großen Maßstabes lediglich marginale Verzerrungen auftreten. Die Unterschiede zwischen diesen flächentreuen und konformen Kartenblättern sind daher gering. Dennoch bietet die *Topographic Image Map Mars 1:200 000* die beispielsweise für wissenschaftliche Interpretationen wichtige Eigenschaft der Flächentreue.

Gemäß den aktuellen IAU-Definitionen basiert der Blattschnitt auf planetozentrischen Breiten und östlichen Längen. Jedes Kartenblatt deckt in der Breite 2° ab. Die Ausdehnung in der Länge nimmt auf Grund der Meridiankonvergenz mit der Breite zu; sie schwankt zwischen 2° am Äquator und 360° für die beiden Poldarstellungen. Die gesamte Mars-Oberfläche ist in 10 372 einzelne Kartenblätter eingeteilt.

Grundsätzlich bilden diese Definitionen und Layout-Vorgaben (siehe Kapitel 3) die Basis für weitere Kartenprodukte. Karten der Maßstäbe 1:100 000 und 1:50 000 lassen sich – ähnlich wie das System der amtlichen topographischen Kartenwerke in Deutschland – aus dem Maßstab 1:200 000 systematisch ableiten. Darüber hinaus ist die Erstellung thematischer Karten geplant. Damit stellt das moderne Kartenwerk *Topographic Image Map Mars 1:200 000* auch die Grundlage für zukünftige Mars-Kartographie dar.

3 Karteninhalte und Blattlayout

Im Folgenden werden die einzelnen Inhalte eines Kartenblattes der *Topographic Image Map Mars 1:200 000* bzw. ähnlicher, abgeleiteter Produkte beschrieben. Sämtliche Komponenten können dabei automatisch mit dem Softwarepaket PIMap generiert werden (vgl. Kapitel 4). Eine Übersicht über das prinzipielle Layout eines Kartenblattes gibt Abb. 3.

3.1 Bilddaten

Die Basis der *Topographic Image Map Mars 1:200 000* sind Bilddaten der Mars-Oberfläche, d.h. farbige Orthobildmosaiken, die aus HRSC-Daten abgeleitet sind. Diese georeferenzierten Mosaiken werden durch das HSRC Co-Investigator Team – beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Berlin-Adlershof bzw. an der FU Berlin – erstellt.

Für die Einbindung als Kartengrundlage müssen die Bilddaten dem Blattschnitt entsprechend zugeschnitten werden. Eine vorausgehende Umprojektion einschließlich Resampling ist nötig, wenn Projektionsparameter – wie beispielsweise der Bezugsmeridian der Sinusoidalprojektion – zwischen den gegebenen Bilddaten und dem zu erstellenden Kartenblatt differieren.

3.2 Höhenlinien

Digitale Geländemodelle (DGMs) der Mars-Oberfläche werden innerhalb des HRSC-Teams aus den Stereokanälen der Kamera berechnet. Sie repräsentieren in Grauwerten codierte Höhenraster und weisen daher den Bilddaten vergleichbare Eigenschaften auf.

Im Kartenblatt wird die Oberflächentopographie in Form von Höhenlinien wiedergegeben, die automatisch aus dem DGM abgeleitet werden. Je nach dargestelltem Gebiet können dabei in Abhängigkeit von Reliefenergie und Kartenmaßstab verschiedene Äquidistanzen so gewählt werden, dass insgesamt ein aussagekräftiges und kartographisch ansprechendes Höhenlinienbild entsteht. In Anlehnung an amtliche topographische Kartenwerke in Deutschland erfolgt die Beschriftung derart, dass Höhenlinienzahlen mit dem Fuß talwärts gerichtet sind. Um Bergkuppen von Senken unterscheiden zu können, werden kurze, unbeschriftete Linien zusätzlich mit einem Kesselpfeil versehen (siehe auch Kartenausschnitt in Abb. 1).

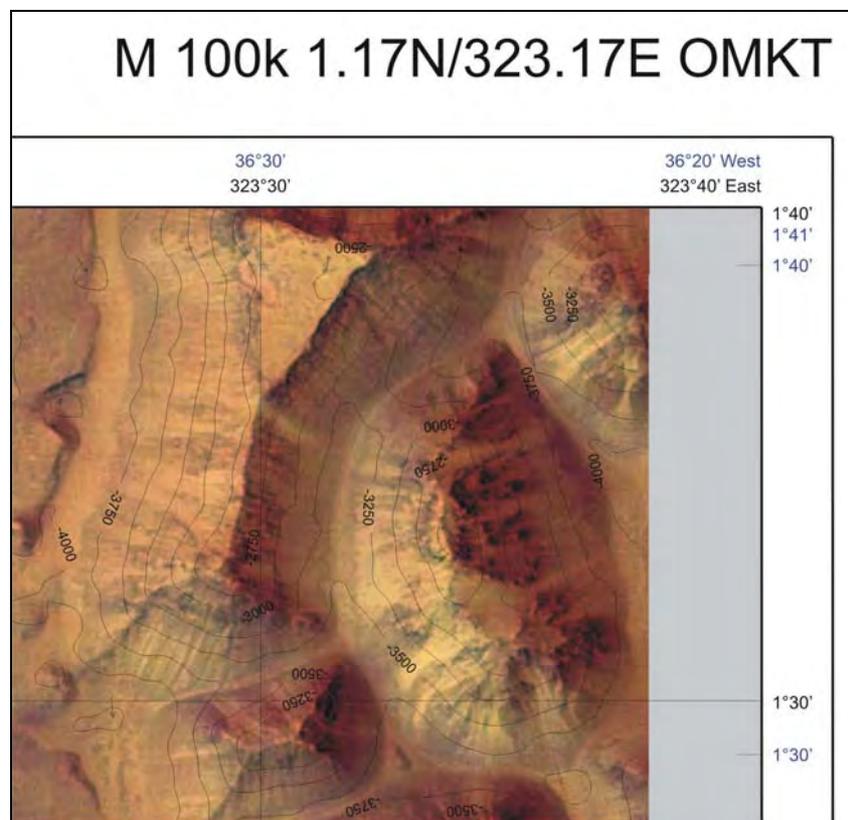


Abb. 1: Verkleinerter Ausschnitt der Karte „M 100k 1.17N/323.13E OMKT, Hydrates Chaos Region“ (für die grau dargestellten Bereiche liegen zurzeit noch keine HRSC-Bilddaten vor)

3.3 Gitternetze

Die planetozentrischen Breiten und östlichen Längen legen den Blattschnitt der *Topographic Image Map Mars 1:200 000* fest und bilden damit auch das Hauptnetz. Dieses wird durch Gitterlinien im Abstand von 0,5° repräsentiert. Ebenso sind die planetographischen Breiten in Kombination mit westlichen Längen, welche das bis vor kurzem auf dem Mars gebräuchliche System widerspiegeln, in Form von farbigen Gitterkreuzen und Randstrichen verzeichnet.

Die Darstellung beider Systeme ist die gängige Vorgehensweise in der aktuellen Mars-Kartographie; deshalb ändern bzw. ergänzen andere Institutionen zum Teil unter großem Aufwand ältere Versionen ihrer Karten entsprechend (vgl. z.B. ROSIEK et al., 2003).

3.4 Nomenklatur

Die Nomenklatur auf dem Mars wird durch die IAU geregelt. Bis heute sind mehr als 1500 Oberflächenformen in 24 verschiedenen Kategorien (Krater, Täler, usw.) benannt. Einen vollständigen und aktuellen Datensatz, der neben den Namen die Lagekoordinaten, Größenangaben und Informationen zum jeweiligen Namensursprung enthält, wird vom *United States Geological Survey* (USGS, 2004) bereitgestellt. Auf Grundlage dieses Datensatzes werden sämtliche Oberflächenformen, welche in einem zu generierenden Kartenblatt liegen, automatisch beschriftet. Dabei wird nach Art und Größeneigenschaften unterschieden; Einzelheiten sind in GEHRKE et al. (2003b) beschrieben.

Des Weiteren enthalten die Karten Signaturen der Landeplätze einschließlich der Angaben von Missionsname und -datum.

3.5 Kartenrandangaben

Kartenblätter werden in ihrem Kopf üblicherweise mit der Gattung, einer Blattbezeichnung bzw. -nummer sowie einem eindeutigen Namen versehen. Die Kartengattung entspricht für alle Blätter der *Topographic Image Map Mars 1:200 000* eben diesem Kartenwerksnamen. In der Blattbezeichnung sind Angaben über Art, Lage und Maßstab der Karte kodiert. Innerhalb der planetaren Kartographie ist diese Bezeichnung meist aus den fünf Elementen Planet – Maßstab – Blattzentrum – Kartentyp – Jahr (*Map Sheet Designation Codes* nach GREELEY & BATSON, 1990) aufgebaut. Mit „M 100k 1.17N/323.17E OMKT“ (hier ohne Jahresangabe) ist ein Kartenblatt auf dem Planeten Mars (M) im Maßstab 1:100 000 (100k) bezeichnet, das bei $1^{\circ}10' \approx 1,17^{\circ}$ nördlicher Breite und $323^{\circ}10' \approx 323,17^{\circ}$ östlicher Länge liegt; es handelt sich um eine Topographische Karte (T) auf Grundlage eines Orthophotomosaiks (OM). Die Karte enthält Farb-Informationen (K), in diesem Fall die Bilddaten (vgl. Abb. 1). Wenn möglich, werden die Kartenblätter zusätzlich mit dem Namen einer abgebildeten Oberflächenform versehen.

Innerhalb der Legende werden die grundlegenden Eigenschaften sowie Karteninhalte erläutert. Im Einzelnen betrifft dies die Parameter der Kartenprojektion, des Referenzellipsoids, des Areoids (Höhenbezug) sowie die Gradnetze als Repräsentation der beiden ellipsoidischen Koordinatensysteme des Mars. Weiterhin werden Informationen zu den verwendeten Bilddaten – Nummern der HRSC-Bilder sowie Angaben zur Datenprozessierung – und Geländemodellen gegeben. Eine Nebenkarte gibt die Lage des Kartenfeldes in Bezug zum Standardkartenwerk an; zusätzlich ist die Referenzierung in den vertrauten, kleinmaßstäbigen Kartenwerken MC 5M bzw. MC 2M zweckmäßig.

4 Automatisierte Kartenherstellung mit PIMap

Die Herstellung von Karten an der TU Berlin innerhalb der Mars Express Mission ist ein vollständig digitaler Prozess; im Mittelpunkt steht dabei das kartographische Software-Paket PIMap (Abb. 2). Die Software PIMap wird seit 2001 in der Programmiersprache C++ an der TU Berlin entwickelt; sie ist sowohl unter Windows- als auch unter Linux-Umgebungen lauf-

fähig und damit universell einsetzbar. Sie berechnet bzw. generiert auf der Basis einer umfangreichen Steuerdatei sämtliche Inhalte der Karte. Ergebnisse sind digitale Kartenblätter, die nach Bedarf gedruckt werden können. Verschiedene Kartenprodukte auf der Basis aktueller HRSC-Daten wurden bereits mittels PIMap erstellt.

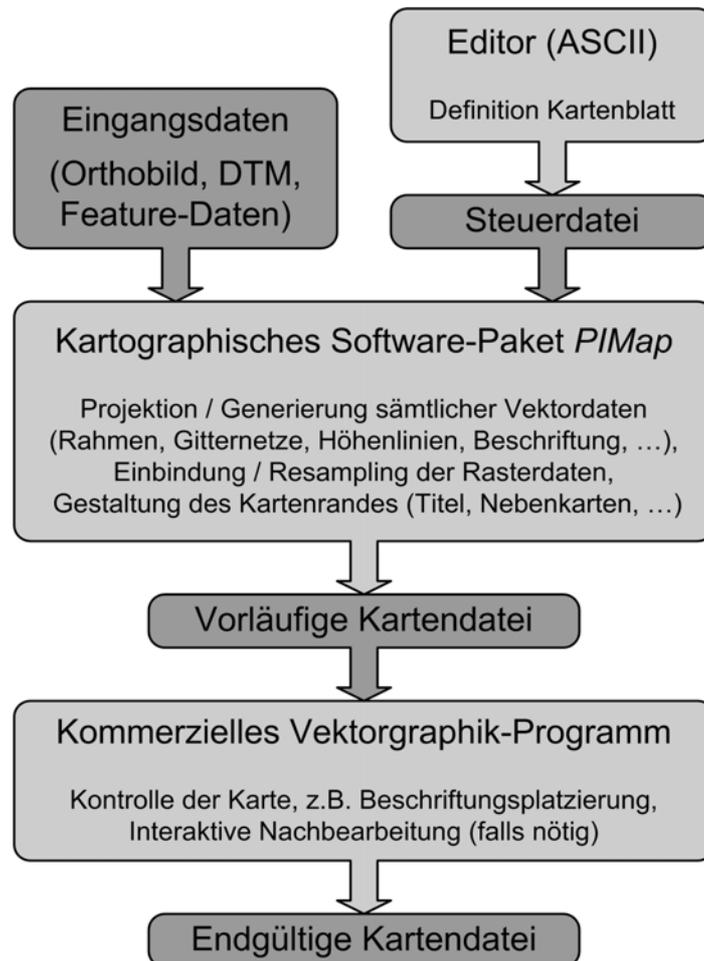


Abb. 2: Überblick über den Datenfluss bei der Kartenerstellung mit PIMap

Die wesentlichen Eingangsdaten sind Orthobildmosaik und DGMS, welche entweder in dem in der Planetenforschung weit verbreiteten Format VICAR oder als Bilddatei (TIFF, JPEG, usw.) in Kombination mit einem ASCII-Header, der die Georeferenzierung enthält, vorliegen können. PIMap passt diese Daten ins Kartenblatt ein; Höhenlinien werden automatisch aus dem DGM abgeleitet und beschriftet. Das Kartenblatt wird in PIMap mit den weiteren in Kapitel 3 beschriebenen Inhalten – u.a. Gitternetze, Kartenfeldrand- und Rahmenlinie, Beschriftung der Oberflächenformen, Kartentitel, Blattbezeichnungen und den weiteren Kartenrandangaben – komplettiert. Mit dem bewährten und weit verbreiteten Adobe PDF erfolgt die PIMap-Ausgabe in ein Datenformat, welches für die Kombination aus Raster- und Vektordaten geeignet und vor allem zuverlässig ist. Dabei können automatisch generierte Kartenblätter bei Bedarf mittels kommerzieller Software (Adobe Illustrator, Corel Draw, Macromedia FreeHand) interaktiv nachbearbeitet werden.

Das Softwarepaket PIMap realisiert neben der Sinusoidalprojektion und der Lambertschen Flächentreuen Azimutalprojektion, wie sie für das Kartenwerk *Topographic Image Map*

Mars 1:200 000 benötigt werden, alle gängigen Kartenprojektionen. Auch lassen sich Blattzentrum und -ausdehnungen sowie Maßstab frei wählen. Damit wird die automatische Erstellung beliebiger Karten der Mars-Oberfläche, insbesondere auch der in Kapitel 2.2 aufgelisteten Produkte, ermöglicht. Darüber hinaus unterstützt PIMap die Kartierung beliebiger planetarer Körper, sofern sie als Kugel oder Rotationsellipsoid parametrisierbar sind.

Aufgrund aktueller Entwicklungen und Ergebnisse der Planetenforschung werden entsprechende Anpassungen und Updates notwendig; ein wesentliches Ziel ist dabei die automatisierte Herstellung thematischer Karten.

5 Überblick über die ersten Ergebnisse

5.1 Testblätter

Mit der grundlegenden Definition des Kartenwerks *Topographic Image Map Mars 1:200 000* im Rahmen des Mars96 Mission wurden die Konzepte an Hand verschiedener Beispielkarten präsentiert. LEHMANN et al. (1999) haben auf Basis dieses Kartenwerks das Sonderblatt „Topographic Image Map Mars 1:200 000, Mars Pathfinder Landing Site, Mouth of Ares and Tiu Valles Region“ hergestellt.

In Vorbereitung auf die Mars Express Mission wurden einige Kartenexemplare generiert, die bereits viele der in den Kapiteln 2 und 3 dargelegten Eigenschaften aufweisen (vgl. GEHRKE et al., 2003b). Neben der kartographischen Umsetzung und Präsentation dieser aktuellen Konzepte war dabei das Hauptziel, die Produktionslinie und vor allem das Softwarepaket PIMap eingehend zu testen. Diese Karten basieren auf Bildmaterial der *Mars Orbiter Camera* (MOC) und Geländemodellen des *Mars Orbiter Laser Altimeter* (MOLA); Ergebnisse wurden durch GEHRKE et al. (2003a, 2003b) vorgestellt.

Neben der Mars-Oberfläche wurde PIMap in Vorbereitung auf die Mission Cassini-Huygens für die Kartierung einiger Saturn-Monde am DLR eingesetzt. Nicht zuletzt dadurch hatte die Software ihre operationelle Einsatzfähigkeit bereits vor Beginn der Mars Express Mission unter Beweis gestellt.

5.2 Topographische Karten aus Mars Express Daten

Mit der Aufnahme der ersten HRSC-Daten und ihrer Prozessierung durch das DLR wurden an der TU Berlin zeitnah auch einige topographische Bildkarten der Mars-Oberfläche generiert. Dabei handelt es sich um Sonderblätter auf der Grundlage des Kartenwerks *Topographic Image Map Mars 1:200 000*, deren Lage an die jeweiligen Bildstreifen so angepasst wurde, dass die ausgewählten Zielgebiete optimal dargestellt werden konnten (vgl. Albertz et al., 2004). Ein Beispiel ist das Kartenblatt „M 100k 1.17N/323.13E OMKT“, welches das Hydraotes Chaos Gebiet im Bereich der Valles Marineris im Maßstab 1:100 000 wiedergibt. Abb. 1 zeigt einen Kartenausschnitt dieser Erosionslandschaft mit ihren charakteristischen Tafelbergen.

Auf Grund der Aufnahmekonfigurationen der HRSC auf Mars Express ist für die vollständige Abdeckung eines Kartenblattes im Maßstab 1:200 000 – bei 2° bzw. etwa 120 km Längenausdehnung – die Breite eines Bildstreifens in der Regel nicht ausreichend (vgl. Einleitung); Mosaikbildungen benachbarter Streifen sind erforderlich. Mit der fortschreitenden Erfassung der Mars-Oberfläche liegen jedoch zunehmend Überlappungsgebiete vor, so dass bereits

wenige Monate nach Missions-Beginn erste Orthobildmosaike und zugehörige DGMs als Ausgangsdaten für die Kartenherstellung prozessiert werden konnten. Auf Basis dieser Daten wurden nunmehr die ersten, vollständig abgedeckten Blätter im Regelblattschnitt der *Topographic Image Map Mars 1:200 000* generiert. So ist beispielsweise das geologisch interessante Talsystem Mangala Valles in mehreren Kartenblättern abgedeckt. In Abb. 3 ist eines dieser Blätter, „M 200k 8.00S/209.00E OMKT“, wiedergegeben.

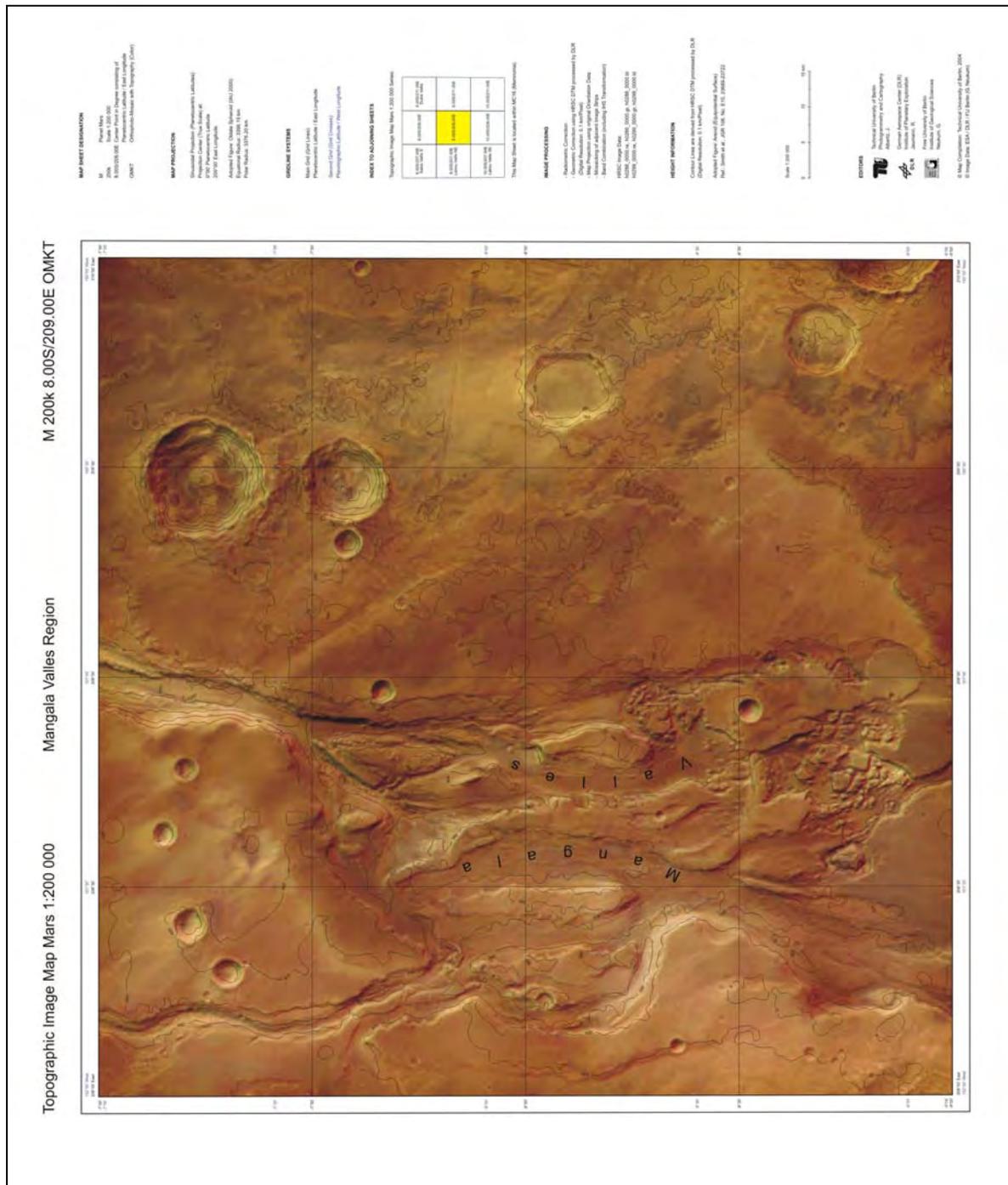


Abb. 3: „M 200k 8.00S/209.00E OMKT, Mangala Valles Region“, eines der ersten Blätter des Kartenwerks *Topographic Image Map Mars 1:200 000*

6 Ausblick

Bereits zu Beginn der Mars Express Mission sind an der TU Berlin in Zusammenarbeit mit dem DLR verschiedene Kartenprodukte der Mars-Oberfläche aus von HRSC-Bilddaten entstanden. Die ersten Blätter des neuen Kartenwerks *Topographic Image Map Mars 1:200 000* liegen vor. Auf Grundlage dieser Ergebnisse und Erfahrungen werden systematisch weitere qualitativ hochwertige Karten generiert, um dem zunehmenden Bedarf – sowohl innerhalb des HRSC Co-Investigator Teams als auch für die Planung zukünftiger Mars-Missionen – nachzukommen.

In Kooperation mit anderen Fachdisziplinen wird an der Erstellung thematischer Karten des Mars gearbeitet. Topographische Basiskarten können dabei nahezu vollautomatisch – unter Verwendung der Software PIMap – generiert werden. Ein Schwerpunkt der zukünftigen Forschung in enger Zusammenarbeit innerhalb des HRSC-Teams wird die geeignete Einarbeitung thematischer Informationen sein. Entsprechende Software-Erweiterungen sind geplant.

7 Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten sind Teil des an der TU Berlin durchgeführten 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 gefördert.

8 Literaturverzeichnis

- ALBERTZ, J., GEHRKE, S., WÄHLISCH, M., LEHMANN, H., SCHUMACHER, T., NEUKUM, G. and the HRSC Co-Investigator Team, 2004: Digital Cartography with HRSC on Mars Express. – IAPRS, Vol. XXXV, Istanbul.
- DUXBURY, T.C., KIRK, R.L., ARCHINAL, B.A., NEUMANN, G.A., 2002: Mars Geodesy/ Cartography Working Group Recommendations on Mars Cartographic Constants and Coordinate Systems. – IAPRS, Vol. XXIV, Ottawa, Part 4.
- GEHRKE, S., WÄHLISCH, M., LEHMANN, H., SCHUMACHER, T., ALBERTZ, J., 2003a: Cartography with HRSC on Mars Express – A Specimen of the New Series “Topographic Image Map Mars 1:200,000”. – Proceedings of the ISPRS WG IV/9 Extraterrestrial Mapping Workshop, Houston.
- GEHRKE, S., WÄHLISCH, M., LEHMANN, H., SCHUMACHER, T., ALBERTZ, J., 2003b: Cartography with HRSC on Mars Express – The New Series “Topographic Image Map Mars 1:200,000”. – Vorträge 23. Jahrestagung der DGPF, Band 12, Bochum 2003: 451-458.
- GREELEY, R., BATSON, R.M., 1990: Planetary Mapping. – 296 p., Cambridge University Press, Cambridge.
- LEHMANN, H., SCHOLTEN, F., ALBERTZ, J., WÄHLISCH, M., NEUKUM, G., 1997: Mapping a Whole Planet – The New Topographic Image Map Series 1:200,000 for Planet Mars. – IAPRS, Vol. XXXI, Vienna, Part 4.

- LEHMANN, H., ALBERTZ, J., WÄHLISCH, M., ZEITLER, W., NEUKUM, G., 1999: The Mars Pathfinder Landing Site – A Topographic Image Map 1:200,000. – Proceedings of the 19th International Cartographic Conference, Section 13, Ottawa: 15-23.
- NEUKUM, G., HOFFMANN, H., JAUMANN, R. and the HRSC Co-Investigator Team, 2004. The High Resolution Stereo Camera (HRSC) Experiment on the ESA Mars Express Mission. – IAPRS, Vol. XXXV, Istanbul.
- OBERST, J. et al., 2004: The Photogrammetric Performance of HRSC in Mars Orbit. – IAPRS, Vol. XXXV, Istanbul.
- ROSIEK, M.R., HOWINGTON-KRAUS, E., HARE, T.M., REDDING, B.L., 2003. Mars Transverse Mercator (MTM) Map Series Updated with Planetocentric Grid. – Proceedings of the ISPRS WG IV/9 Extraterrestrial Mapping Workshop, Houston.
- 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.
- SEIDELMANN, P.K. et al., 2004: Report of the IAU/IAG Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements: 2003. – Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, im Druck.
- USGS, 2004: Gazetteer of Planetary Nomenclature. – <http://planetarynames.wr.usgs.gov> (10.06.2004).

Geometrische Grenzen für den Einsatz der Time Delay and Integration (TDI) Methode in Zeilenkameras für Fernerkundung

ARMIN K. DRESCHER¹

Zusammenfassung: Digitale Zeilenkameras für Fernerkundung erzeugen kontinuierliche Bildstreifen durch die stetige Bewegung einer Kamera mit nur einer Detektorzeile pro Messaufgabe in einem Flugzeug oder Satelliten. Der Bildraum unmittelbar vor und hinter der Detektorzeile bleibt ungenutzt. In der Time Delay and Integration (TDI) Methode wird die singuläre Zeile durch einen Flächendetektor (Array) mit einer begrenzten Anzahl paralleler Detektorzeilen ersetzt. Der Aufnahme- und Ausleseprozess für diese Zeilen wird mit dem Bildfluss über das Array synchronisiert, so dass die Signale der parallelen Zeilen summiert werden können. Die einsetzbare Zeilenzahl hängt davon ab, inwieweit sich in der aktuellen Aufgabenstellung ein Bildfluss senkrecht zur Zeilenrichtung mit konstanter Flussgeschwindigkeit (konstantem Bildmaßstab) einrichten und gewährleisten lässt. Die Limitierungen des TDI Verfahrens werden an Hand geometrischer Parameter der Objekte, der Bewegung und der optischen Abbildung dargestellt. Hierbei wird auch auf Schrägsichtbedingungen sowie die Effekte von Erdkrümmung und Erdrotation eingegangen.

1 Einführung und Radiometrische Grundlagen

1.1 Natürliche Grenzen für die Dichte des Informationsflusses

Die Fernerkundung der Erde durch Satelliten oder Flugzeugen nutzt entweder die reflektierte Sonnenstrahlung oder die thermische Eigenstrahlung von Land- bzw. Wasseroberflächen oder der Atmosphäre als primäre Informationsquelle. Diese Strahlungsquellen können vereinfachend als Schwarzkörperstrahlung der Sonne und der Erdoberfläche modelliert werden. Im ersten Fall als 5700K Strahlung, gedämpft um das Quadrat des Verhältnisses von Sonnen- zu Erdbahnradius, wenn man für die Rückstreuung der Erdoberfläche eine Lambert'sche Albedo von 1 (perfekte Schneefläche) ansetzt. Für die Thermalemission der Erdoberfläche wird hier eine räumlich homogene Schwarzkörperstrahlung von 270K angenommen. Damit liegt die maximal zur Verfügung stehende Dichte des spektralen Strahlungsflusses $\Phi\lambda$ fest, definiert als Photonenzahl pro Flächeneinheit A [μm]², Raumwinkel Ω [sr], Zeiteinheit T_{int} [ms] und Spektralintervall $\delta\lambda$ [μm]. In Abbildung 1 und Abbildung 2 werden diese Flussdichten für ein konstantes spektrales Auflösungsvermögen $\delta\lambda/\lambda$ von 1/1000 dargestellt. Die angegebenen Einheiten dienen der Handlichkeit der Flussberechnungen an einem Strahlungsdetektor.

1.2 Messen als raumzeitliches Filtern des Informationsflusses

Das Anmessen eines einzelnen Bodenpixels durch eine bewegte Zeilenkamera kann als Multiplikation bzw. Faltung der spektralen Strahlungsflussdichte $\Phi\lambda$ mit der Kamerafunktion KF beschrieben werden. KF stellt sich dar als Produkt aus der Messzeit pro Pixel T_{int} , dem Geometriefaktor der Kamera GF , der spektralen Bandbreite $\delta\lambda$ und dem technisch bedingten Verlustfaktor VF der Kamera. Die Integrationszeit T_{int} ergibt sich aus dem Durchmesser des Bodenpixels D_{pix} geteilt durch die Bodenspurgeschwindigkeit V_{bsp} der Kamera. V_{bsp} liegt

¹ Armin K. Drescher, Institut für Methoden der Fernerkundung, DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Zentrum Oberpfaffenhofen, 82234 Weßling, e-mail: armin.drescher@dlr.de

bei 6800 [m/s] für polar umlaufende Satelliten und 50-120 [m/s] für Flugzeuge. Der Geometriefaktor GF stellt das Produkt von aufnehmender Fläche A und zugeordnetem Raumwinkel Ω der Messung dar. Nach dem Flusserhaltungssatz für optische Abbildungen kann GF mit dem gleichen Ergebnis alternativ an drei Stellen errechnet werden, siehe Abbildung 3:

$$GF = A_{\text{pix}} * \Omega_{\text{pix}} = A_{\text{opt}} * \Omega_{\text{pix}} = A_{\text{det}} * \Omega_{\text{det}} = \text{konstant} \quad (1)$$

Der Geometriefaktor GF bestimmt die Kameradimensionen und damit deren Kosten. Er wird daher stets minimal, d.h. beugungsbegrenzt als GF_{beug} ausgelegt. Sind die Wellenlänge λ und die Aperturfläche der Optik A_{opt} gegeben, so errechnet sich das beugungsbegrenzte Auflösungselement Ω_{beug} , (der Raumwinkel des Beugungsscheibchens) und GF_{beug} zu:

$$\Omega_{\text{beug}} [\text{sr}] = (\pi * 1,22 * \lambda [\mu\text{m}])^2 / (4 * A_{\text{opt}} [\mu\text{m}^2]) \quad (2)$$

$$GF_{\text{beug}} [\mu\text{m}^2\text{sr}] = (\pi * 1,22 * \lambda [\mu\text{m}] / 2)^2 \quad (3)$$

GF_{beug} hängt also nur von der Wellenlänge ab und erweist sich dadurch als unabhängig von der Größe des Bodenpixels oder einzelnen technischen Kameraparametern. Man erhält den gleichen Wert für GF_{beug} wenn man die Detektorfläche oder das Bodenpixel als Apertur des Strahlengangs und die Aperturfläche der Optik als Beugungsscheibchen des Detektors bzw. des Bodenpixels auffasst.

Der technisch bedingte Verlustfaktor VF der Kamera ergibt sich als Produkt aus der Optiktransmission T_{opt} und der Quantenausbeute QA des Detektors. Als Messergebnis liegt das Signal S [photonNR] als Produkt aus der spektralen Strahlungsflussdichte $\Phi\lambda$ mit der Kamerafunktion KF als Zahl der Photoelektronen vor, die am Detektorausgang für die (weitgehend verlustlose) elektronische Signalverarbeitung pro Bodenpixel zur Verfügung stehen.

Die nicht unterschreitbare (natürliche) Unsicherheit des Messsignals S ergibt sich aus dem Photonenrauschen (englisch: photon shot noise) zu \sqrt{S} [photonNR] und das maximal erreichbare Signal zu Rausch-Verhältnis SNR (englisch: signal to noise ratio) ebenfalls zu \sqrt{S} , jeweils als 1σ -Wert der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Die Wurzel aus der Anzahl der Photoelektronen pro Bodenpixel am Detektorausgang ist also gleichbedeutend mit der maximalen Anzahl der statistisch unabhängigen Intensitätsintervalle, d.h. der radiometrischen Auflösung der Messung.

1.3 Informationsgewinn und Verlust durch TDI-Signalsummation

Angesichts ständig weiter wachsender Anforderungen sowohl an die spektrale wie auch an die Bodenauflösung der Fernerkundung im optischen Spektralbereich sowie der hohen Fluggeschwindigkeiten von polar umlaufenden Satelliten und Flugzeugen lässt sich eine zunehmende Anzahl von Aufgaben nicht mehr mit den beugungsbegrenzten Minimaldimensionen der Geräte befriedigen. Als Alternative zu einer teuren Überdimensionieren der Geräte bietet ein Nutzen von Redundanzen im Bildaufnahmeprozess an.

Digitale Zeilenkameras für Fernerkundung erzeugen kontinuierliche Bildstreifen durch die stetige Bewegung der Kamera in einem Flugzeug oder Satelliten. Neuerdings werden um eine senkrechte Achse rotierende Zeilenkameras auch in der Nahbereichsphotogrammetrie eingesetzt. In all diesen Fällen erzeugt die Kamerabewegung einen dauerhaften, weitgehend parallelen Fluss des Bildinhalts über die Fokalebene der jeweiligen Kamera. Da sich die Kamera-

perspektive während der Kamerabewegung nur langsam ändert bleiben die inneren Bezüge des Bildinhalts über längere Strecken erhalten (Selbstähnlichkeit des Bildes während des Bildlaufs). Die Bildgeneration in bewegten Zeilenkameras erfolgt bisher überwiegend mit einer einzigen Detektorzeile pro Messaufgabe (Farbe oder Blickrichtung). Die Bildinformation im Bildraum unmittelbar vor und hinter dieser singulären Zeile bleibt ungenutzt.

In der Time Delay and Integration (TDI) Methode wird die Detektorzeile einer einfachen Zeilenkamera durch ein Zeilen-Array, einen Flächendetektor mit einer stark begrenzten Anzahl paralleler Detektorzeilen ersetzt. Der Bildaufnahme- und Ausleseprozess für diese Zeilen wird mit dem Bildfluss senkrecht zur Zeilenrichtung synchronisiert, so dass die Signale der parallelen Zeilen aufsummiert werden können. Der erzielbare Signalgewinn ist proportional zur einsetzbaren Anzahl der parallelen Zeilen, der Gewinn für das Signal zu Rausch Verhältnis SNR, bzw. für die radiometrische Auflösung ist die Wurzel aus dieser Zahl.

Im TDI-Verfahren können die Komponente des Bildflusses in Zeilenrichtung und die Inhomogenität des Bildflusses senkrecht zu dieser Richtung nicht kompensiert werden und führen zu systematischen Fehlern. Die maximal nutzbare Zeilenzahl wird durch diese beiden Effekte begrenzt. Generell lässt sich sagen, dass das TDI-Verfahren den Gewinn an radiometrischer Genauigkeit mit einem Verlust an geometrischer Präzision erkauft.

2 Geometrische Analyse der TDI-Methode

2.1 Abbildungsgeometrie, Bildfluss und Fehlertoleranzen

Der über den TDI-Prozess gemittelte geometrische Fehler der Bildposition ist genau die Hälfte des Bildlauffehlers BLF der innerhalb der TDI-Detektorfläche auftritt, jeweils gemessen als Pixelzahl [Pixel]. Der maximal tolerierbare Bildlauffehler wird von der jeweiligen Anwendung der Bilder abhängen. Die höchsten Anforderungen bestehen in der Photogrammetrie. Hier werden Genauigkeiten der Bildkorrelation von 0,1 Pixel und besser erzielt. Der Bildlauffehler BLF des TDI-Verfahrens sollte also nicht mehr als 0,1 bis höchstens 0,2 Pixel betragen. Die geringsten Anforderungen bestehen bei der Beobachtung der horizontalen Struktur der Atmosphäre (Wolkenbildern), da hier oft nur Ensemblemittelwerte interessieren, ohne hohe Anforderungen an die positionelle Genauigkeit. Hier kann ein Bildlauffehler von 1 bis 2 Pixel toleriert werden.

Die einsetzbare Zeilenzahl hängt davon ab, inwieweit sich in der aktuellen Aufgabenstellung ein Bildfluss senkrecht zur Zeilenrichtung mit gleichmäßiger Flussgeschwindigkeit (konstantem Bildmaßstab) einrichten und gewährleisten lässt. Technisch gesehen verlangt dies eine sorgfältige Ausrichtung der optischen Achse senkrecht zur Erdoberfläche und eine ebenso präzise Ausrichtung der Sensorzeilen senkrecht zur Bodenspur der bewegten Kamera. In der Anwendung vom Flugzeug aus benötigt die TDI-Methode daher den Einsatz hochstabilisierter Plattformen. Für eine effiziente Regelung der Plattform müssen deren Anstellwinkel und die Flugzeugdrift eventuell über zusätzliche Sensoren (z.B. Vorlaufkameras) gemessen werden.

2.2 Leistungsgrenzen für Nadir-blickende Kameras

2.2.1 Begrenzungen durch die Querkomponente des Bildflusses

Eine Obergrenze für die zulässige Zeilenzahl ZNR_{quer} der TDI-Methode ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen Quer- und Längskomponente BL_q und BL_l des Bildlaufvektors BLV [pixel/s]. Für den Schräglaufwinkel γ des Bildlaufs und die Zeilenzahl ZNR_{quer} gilt:

$$\text{TAN}(\gamma) = \text{BL}_q \text{ [pixel/s]} / \text{BL}_l \text{ [pixel/s]} \quad (4)$$

$$\text{ZNR}_{\text{quer}} = \text{BLF} \text{ [pixel]} / \text{tan}(\gamma) = \text{BLF} \text{ [pixel]} * \text{BL}_l \text{ [pixel/s]} / \text{BL}_q \text{ [pixel/s]} \quad (5)$$

Ein schräger Bildlauf kann durch Seitenwind, aber auch durch eine Rolldrift des Kameraträgers erzeugt sein. Der Schräglaufwinkel γ [rad] aus der Rolldrift [rad/s], ergibt sich aus der Bodenspurgeschwindigkeit V_{bsp} [m/s] und der Flughöhe H [m] zu:

$$\text{TAN}(\gamma) = \text{Rolldrift} \text{ [rad/s]} * H \text{ [m]} / V_{\text{bsp}} \text{ [m/s]} \quad (6)$$

Im Satelliteneinsatz ergibt sich ein Bildschräglauf (auffällig z.B. bei Landsat-Bildern) aus der Komponente der Erdrotation senkrecht zur Bahnebene des Satelliten, mit einem Maximum am Äquator und einem Nulldurchgang an den polnahen Wendepunkten der Satellitenbahn.

Die typische Geschwindigkeit polar umlaufender sonnensynchroner Fernerkundungssatelliten V_{bsp} = 6800 [m/s] und die Erdrotation am Äquator von 463 [m/s] ergeben:

$$\text{TAN}(\gamma) = 463 \text{ [m/s]} / 6800 \text{ [m/s]} = \text{TAN}(3,88^\circ) \quad (7)$$

2.2.2 Begrenzungen durch die Längskomponente des Bildflusses

Eine Obergrenze für die zulässige Zeilenzahl ZNR_{längs} der TDI-Methode ergibt sich aus der Ungleichmäßigkeit der Längskomponente des Bildlaufs (senkrecht zur Zeilenrichtung), primär aus der Variation des Bildmaßstabs innerhalb des Bildes, also aus dem Verhältnis zwischen der Variationsbreite der Geländehöhe dH [m] und der Flughöhe H [m] und unabhängig von der Fluggeschwindigkeit zu:

$$\text{ZNR}_{\text{längs}} = \text{BLF} \text{ [pixel]} * H \text{ [m]} / dH \text{ [m]} \quad (8)$$

Eine Nickdrift [rad/s] des Kameraträgers erzeugt einen zur Flughöhe proportionalen Maßstabsfehler dBM. Dessen Verhältnis zum Bildmaßstab BM ergibt sich zu

$$dBM / BM = \text{Nickdrift} \text{ [rad/s]} * H \text{ [m]} / V_{\text{bsp}} \text{ [m/s]} \quad (9)$$

Die Gierwinkeldrift kann als eine längs der Zeile variable Nickwinkeldrift mit der Formel (9) beschrieben werden. Kleine Winkelabweichungen dW der optischen Achse von der Nadirrichtung erzeugen aus der Sicht der Kamera eine zusätzliche Variationsbreite dH_w der Geländehöhe proportional zu dW und der Bildstreifenbreite BSB zu:

$$dH_w \text{ [m]} = dW \text{ [rad]} * \text{BSB} \text{ [m]} \quad (10)$$

Die Krümmung der Erdoberfläche führt bei Nadir-blickenden Satellitenkameras zu einer erheblichen effektiven Geländeüberhöhung dHk, wenn große Bildstreifenbreiten zur Anwendung kommen, wie z.B. in der Fernerkundung von Ozean und Atmosphäre. Aus dem Erdradius ER und der auf der Erdoberfläche gemessenen Bildstreifenbreite BSB ergibt sich dHk zu:

$$dHk [km] = (ER [km]) * \{ 1 - \cos((BSB [km]) / (2 * ER [km])) \} \quad (11)$$

Ist nur der Blickwinkel β vom Satelliten aus der Höhe Hsat zum Bildstreifenrand gegeben, so kann der Erdzentralwinkel ρ [rad] = (BSB [km]) / (2 * ER [km]) aus folgender Bedingung errechnet werden (siehe Abb. 4):

$$ER * \sin(\beta + \rho) = (ER + H_{sat}) * \sin(\beta) \quad (12)$$

Bei der Berechnung der im TDI-Verfahren zulässigen Zeilenzahl ZNrlängs ist in diesem Satellitenbeispiel noch zu berücksichtigen, dass der sequentielle Bildaufbau durch die Bewegung der Nadirzeile keinen konstanten Bildmaßstab längs der Nadirzeile ergibt! Zum Bildstreifenrand hin nimmt der Zeilenabstand mit zunehmendem Erdzentralwinkel ρ ab gemäß (vergleiche die Formeln (8), (11) und Abb. 4):

$$\text{Längspixel [m]} = (\text{Nadirpixel [m]}) * \{ 1 - \cos(\rho \text{ [rad]}) \} \quad (13)$$

2.3 Leistungsgrenzen für schräg blickende Kameras

2.3.1 Leistungsgrenzen für Seitensicht aus dem Flugzeug

Werden Kameras mit kleiner Nadir-Bildstreifenbreite BSBn [m] aus der Flughöhe H [m] seitlich um den Schrägsichtwinkel β [rad] ausgeschwenkt, um ein Gebiet seitlich des Flugstreifens aufzunehmen, so entsteht am Durchstoßpunkt der optischen Achse mit Erdoberfläche im Abstand Dss (vergleiche Abb. 4, rechts) eine um den Winkel β schräggestellte Referenzebene (nach unten projizierte Fokalebene) mit der effektiven Bildstreifenbreite BSBss und einer zusätzlichen effektiven Geländehöhe dHss:

$$BSB_{ss} [m] = (BSB_n [m]) / \cos(\beta \text{ [rad]}) \quad (14)$$

$$dH_{ss} [m] = (BSB_{ss} [m]) * \tan(\beta \text{ [rad]}) \quad (15)$$

Einsetzen der effektiven Höhe dHss in die Formel (8) zeigt, wie schnell die zulässige Zeilenzahl für die TDI-Methode mit dem Winkel β abnimmt.

2.3.2 Leistungsgrenzen für Seitensicht aus dem Satelliten

Beim seitlichen Ausschwenken von Satellitenkameras muss der Erdkrümmungseffekt mit berücksichtigt werden. Zuerst müssen die Werte für den Erdzentralwinkel ρ und für die Erdkrümmungshöhe dHk gemäß Abbildung 4 mit den Formeln (11) und (12) berechnet werden.

Für den Abstand D_{ss} , die effektive Bildstreifenbreite BSB_{ss} und die effektiven Geländehöhe dH_{ss} ergeben sich dann die Werte:

$$D_{ss} [m] = (H_{sat} [m] + dH_k [m]) / \cos(\beta [rad]) \quad (16)$$

$$BSB_{ss} [m] = (BSB_n [m]) * (D_{ss} [m]) / (H_{sat} [m]) \quad (17)$$

$$dH_{ss} [m] = (BSB_{ss} [m]) * \tan(\beta [rad] + \rho [rad]) \quad (18)$$

Photons/ $\mu\text{m}^2\text{sr}*\text{ms}$, Vertical Sun, Albedo 1, Spectral Resolution $\delta\lambda/\lambda = 1/1000$

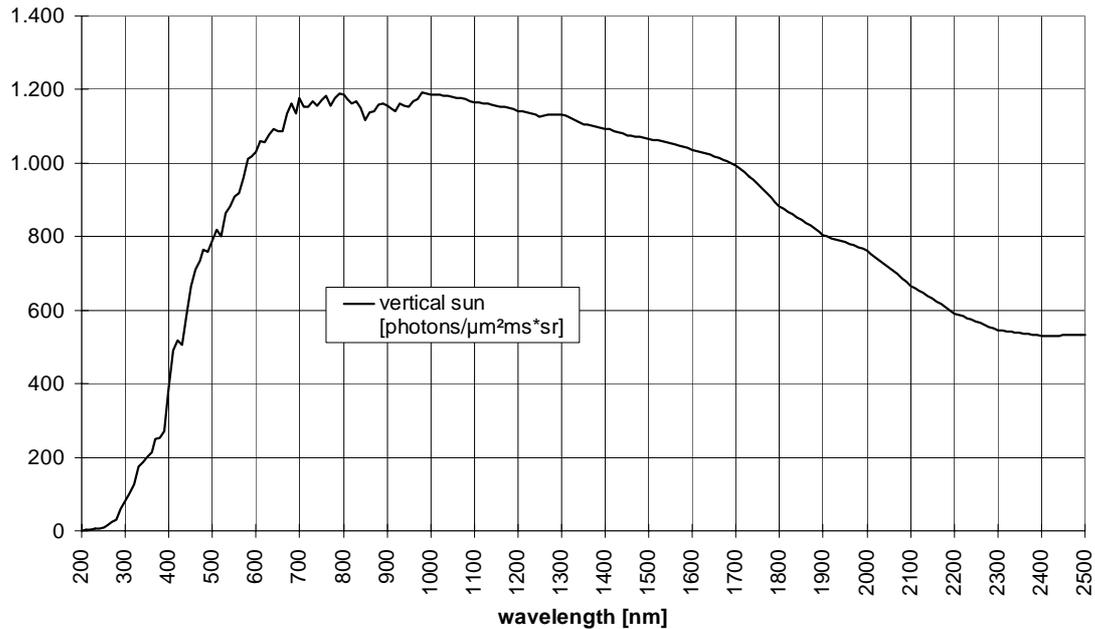


Abb. 1: Maximale spektrale Flussdichte im solar-reflektiven Spektralbereich

Photons/ $\mu\text{m}^2\text{sr}*\text{ms}$, Thermal Emission, 270 K, Spectral Resolution $\delta\lambda/\lambda = 1/1000$

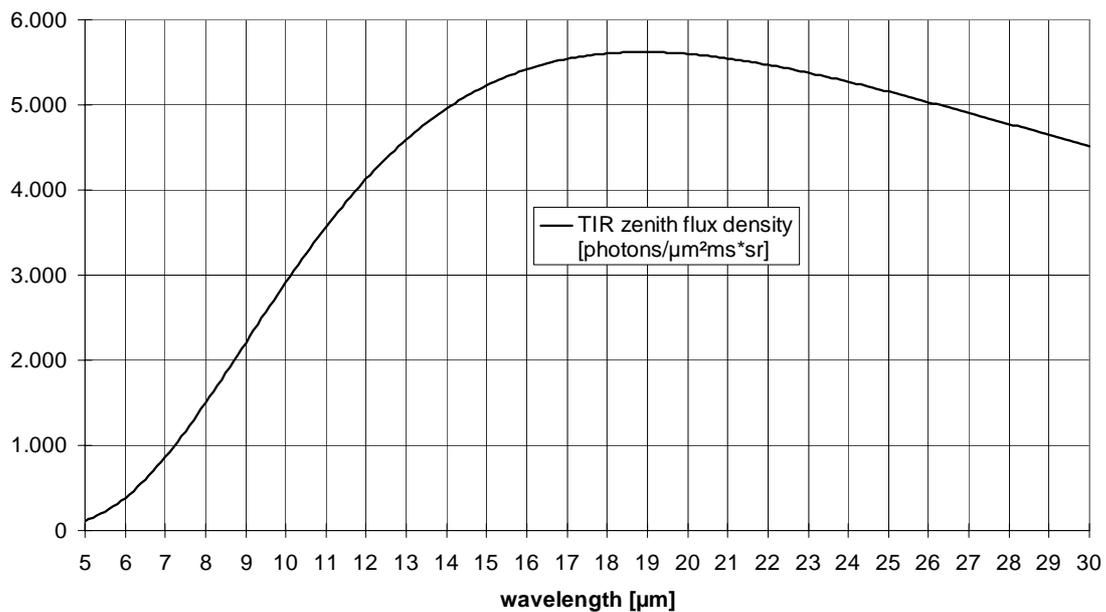


Abb. 2: Maximale spektrale Flussdichte im thermal-infraroten Spektralbereich

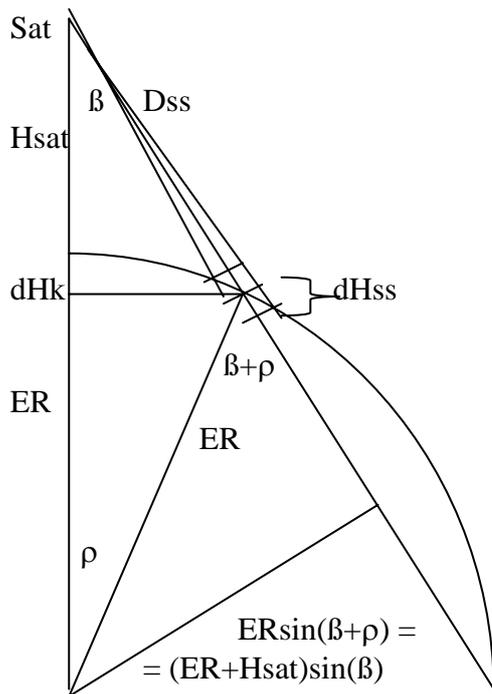


Abb. 4: Zu den Erdkrümmungseffekten

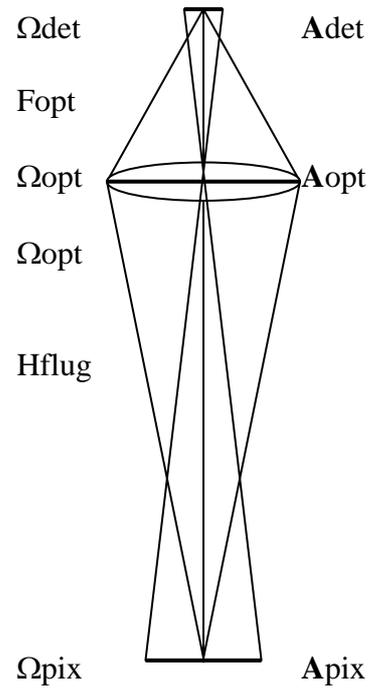


Abb. 3: Optische Flussserhaltung

3. Literaturverzeichnis

- DRESCHER, A., MERTENS, V., SEBASTIAN, I., 1997: Dimensioning Considerations for Optical Remote Sensing Instruments on Small Satellites, IAA-Symposium on Small Satellites for Earth Observation, Berlin 1997, IAA-B0506P.
- JAHN, H., SCHEELE, M., 1997: Zur optimalen Anpassung von Objektiven an CCD-Sensoren, Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation (PFG) 2/1997, S. 103-115.

Fernerkundung im Labor - Ein Outdoor-Handspektrometer in der Laboranalytik

SYBILLE JANSSEN-WEETS¹, ANDREAS FISLER², RALF JANTOS² & MANFRED WEISENSEE²

Zusammenfassung: Der Boden unterliegt täglich irreversiblen Schädigungen durch Bodenversiegelung, Bodenerosion und Verunreinigung. Die steigenden Belastungen ergeben sich durch eine hohe Konzentration von Menschen und Tätigkeiten auf begrenzter Fläche und der daraus entstehenden Nutzung. Um diese Flächen zu überwachen und ggf. den Sanierungserfolg zu protokollieren, sind Analysen nötig. Durch die Nutzung nur eines Instrumentes für den In- und Outdoorbereich wird sich eine enorme Aufwandsverringern in Analytik und Kalibrierung und somit eine Kosten- und Zeitersparnis ergeben. Dieses Paper berichtet über die Konzeptionierung und Anwendung eines kombinierten In- und Outdoorsystems unter Berücksichtigung multipler Spannungsversorgung, Kalibrierung, Lichtwellenleiter, und Sonden.

1. Einleitung

Primäre Ursachen der heutigen weltweiten Umweltbelastungen beispielsweise mit Schwermetallen, sind vor allem der Bergbau, die metallverarbeitende Industrie, militärische Altlasten sowie der Einsatz von Pestiziden, mineralischen Düngern und Klärschlamm auf landwirtschaftlichen Nutzflächen (EEA2003). Nach einer Studie sind alleine in Deutschland ca. 300.000 bis 400.000 Verdachtsflächen mit gesundheits- und umweltschädigende Stoffen belastet (EEA2002). Diese Natur- und Landschaftsräume sind für Tiere und Menschen eine Gefahr, da sie in den meisten Fällen unbeachtet von der Allgemeinheit existieren. Eine Möglichkeit, die Schwermetallsanierung auf großen, moderat belasteten Flächen zu betreiben, ist die Phytoextraktion, also die Akkumulation der Schwermetalle in Pflanzen mit einer anschließenden Entsorgung über Kompostierungs- bzw. Verbrennungsanlagen. Um die Eignung und den Stand der Phytoremediation zu erfassen bzw. zu überwachen müssen die Flächen mit geeigneten Labor- und Außendienstmethoden analysiert werden. Um Rückschlüsse auf die Aufnahmefähigkeit von Schwermetallen zu treffen, wird z.B. die Chlorophyllkonzentration in Pflanzen bzw. in Pflanzenteilen bestimmt. In diesem sogenannten „Blue-Shift“ (HORLER ET AL. 1983) (ZARCO 1998) zeigen sich bei Schwermetallbelastungen Veränderungen im NIR-Spektrum.

Durch die Nutzung nur eines Gerätes für die In- und Outdoorbereiche wird sich eine enorme Aufwandsverringern in Analytik und Kalibrierung und somit eine Kosten- und Zeitersparnis ergeben.

¹ Dipl.-Ing. (FH) Sybille Janssen-Weets, EUTEC - Emdener Institut für Umwelttechnik, FH Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven, Constantiaplatz 4, 26723 Emden, e-mail: janssenweets@bodensan.de

² IAPG - Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik, FH Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven, Ofener Str. 16-19, 26121 Oldenburg
Dipl.-Ing. (FH) Andreas Fiser, e-mail: fisler@bodensan.de
Dipl.-Ing. (FH) Ralf Jantos, e-mail: jantos@bodensan.de
Prof. Dr. Manfred Weisensee, e-mail: weisensee@bodensan.de

2. Instrumente

2.1. Perkin Elmer Lambda 20

Bei dem Perkin Elmer Lambda 20 handelt es sich um ein Zweistrahlenspektrometer für den UV/VIS Bereich, das für die Routineanalytik im Labor eingesetzt wird. Die UV/VIS - Spektroskopie findet Anwendung in der quantitativen und qualitativen Analyse zur Bestimmung von Transmission und Absorption von Lösungen und Feststoffen, sowie der Beobachtung von Reaktionsverläufen.

Das Perkin Elmer Lambda 20 - Spektrometer arbeitet mit einem reflektierenden optischen System und hat einen Festspalt von 1 nm. Der Arbeitsbereich des Spektrometers liegt zwischen

190 nm und 1100 nm. Als Strahlungsquelle dient im VIS-Bereich eine Halogenlampe, im UV-Bereich eine Deuteriumlampe. Das Umschalten zwischen den Strahlungsquellen erfolgt automatisch bei 326 nm. Das Perkin Elmer Lambda 20 kann bis zu 200 verschiedene Methoden mit individuellen Parameterwerten für bestimmte Analysen speichern.



Abb. 1: Laborspektrometer

Technische Daten:

- Wellenlängenbereich: 190 bis 1100 nm
- Strahlungsweg im Probenraum: 121 mm
- Gitter Monochromator: Holographisches Gitter mit 1053 Linien/mm
- Messbereich Ordinate: Extinktionsgrad -6,000 bis +6,000
- Genauigkeit: Extinktiongrad $\pm 0,003$
- Strahlungsquelle: vorjustierte Deuterium- und Halogenlampe
- Detektor: Photodioden für Proben- und Referenzstrahl

2.2. Trios Ramses-ACC-VIS

Bei dem Ramses-ACC-VIS handelt es sich um einen unabhängigen, kompakten Hyperspektral-Sensor im VIS-Bereich. Er ist speziell für den Außeneinsatz unter widrigen Verhältnissen konzipiert. Das Gehäuse besteht aus Chromstahl und ist in der Grundausstattung spritzwasser- und staubgeschützt. Als OEM-Komponente ist eine Spektrometerkomponente der Firma Zeiss integriert. Die Firma TRIOS hat rund um dieses OEM-Bauteil ein Gehäuse, eine Schnittstelle und Software entwickelt. Die

Stromversorgung kann über einen weiten Bereich von 12 V DC über 110 V AC 60 Hz bis hin zu 240

V AC 50Hz erfolgen und prädestiniert damit das Gerät für den Outdooreinsatz. Das Gerät wird über eine externe Box gesteuert, die je nach Ausstattung auch die Datenspeicherung



Abb. 2: Outdoor Spektrometer

übernimmt. Der Wellenlängenbereich reicht im verwendeten Instrument von 320 nm bis 950 nm wobei 10 nm im Anfangsbereich automatisch für die Dunkelstromkalibrierung während jeder Messung genutzt werden. Zuleitungen zwischen Box und Sensor von bis zu 50m sind möglich. Der Anschluss an einen PC/Laptop erfolgt über eine serielle Schnittstelle bzw. über ein Seriell-USB Konverter der den Anschluss an USB 1.1 oder USB 2.0 ermöglicht.

Technische Daten:

- Outdoorgerät (Wasser- und staubgeschützt, 12V Stromversorgung)
- genormter Lichtleiteranschluss SMA (vom Gitter entkoppelt)
- Wellenlängenbereich von 320 bis 950 nm
- Spektraler Pixelabstand von 3,3 nm

2.3. Zusatzkomponenten zum Laboreinsatz vom Hyperspektralscanner

Diese Komponenten sind nötig um für das Outdoorinstrument die gleichen Rahmenbedingungen wie dem Laborspektrometer zu geben.

2.3.1. Küvettenhalter

Der Küvettenhalter ist mit zwei SMA-Anschlüssen ausgestattet. Mit Hilfe einer Haube lässt sich der Streulichtanteil minimieren bzw. ausschließen. Er ist für 10 mm Standard-Küvetten konzipiert. Durch das Einbringen von bis zu 5 mm Filtern in den Strahlengang kann das einfallende Licht bzw. dessen Spektrum verändert werden.



Abb. 3: Küvettenhalter

2.3.2. Beleuchtung HL-2000

Bei der HL-2000 handelt es sich um eine elektrisch/thermisch stabilisierte Wolfram-Halogen-Lichtquelle (Abb.4). Ihre Bandbreite reicht vom sichtbaren bis in den NIR Spektralbereich. Die Kopplung an Lichtwellenleiter erfolgt über einen justierbaren SMA-Anschluss. Durch die flexible Eingangsspannung (7-20V DC), den robusten Aufbau und der thermischen Stabilisierung eignet sie sich hervorragend für den Outdoor-Einsatz. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit bis zu 3 mm dicke Filter in den Strahlengang zwischen Lichtquelle und Lichtwellenleiter zu führen.



Abb. 4: Stabilisierte Halogenlichtquelle

Technische Daten:

- Stromversorgung: 7 – 20V DC 0,5 – 2A (12V DC / 1,4A)
- Lampenleistung: 7W
- Farbtemperatur: 2960° K

- Wellenlängenbereich: 320 bis 1700 nm
- Spannungsstabilität: +/- 0,5%
- Opt. Ausgangsleistung: 80000 lm/m²

3. Messungen

Damit die Ergebnisse vergleichbar sind, müssen vor dem Einsatz des Handspektrometers die Herstellerangaben überprüft und die Resultate mit anderen Multispektralsensoren bzw. Photometern abgestimmt werden. Zur Vermeidung von äußeren Lichteinflüssen wird eine geschlossene Aufnahmekonfiguration mit folgenden Bestandteilen gewählt:

- konstante Lichtquelle, HL-2000,
- Küvettenhalter,
- Aufnahmesensor Trios,
- Lichtwellenleiter zur Übertragung.

Als Einsatz für die Küvettenhalter dienten vier verschiedene Küvetten mit kalibrierten Eigenschaften. Ein Filter (F1) besteht aus Holmiumoxidglas (Ho₂O₃), das auf Grund der chemischen Eigenschaften eine Reihe von schmalen Absorptions-Peaks im ultravioletten, sichtbaren und infraroten Bereich aufweist. Des Weiteren stehen drei Neutralglasfilter (F2 bis F4) zur Verfügung, die sich durch ihre Homogenität, Stabilität und relativ konstante Transmission im sichtbaren Bereich auszeichnen.

Die Messreihenfolge erfolgte immer nach dem gleichen Schema:

- Messung der Lichtquelle
- Messung der Küvette
- Messung der Lichtquelle

Diese Messabfolge prüft die Stabilität der Lampe und des Sensors. Da sich beim Vergleich der Lichtquellenmessungen keine Änderungen über einen Zeitraum von mehreren Stunden ergaben, ist über den Zeitraum nachgewiesen, dass das eingesetzte Equipment und der Messaufbau als konstant angesehen werden können.

Die Messung der Holmiumoxidküvette (F1) mit dem Trios Sensor ergab folgendes Messergebnis der spektralen optischen Dichte:

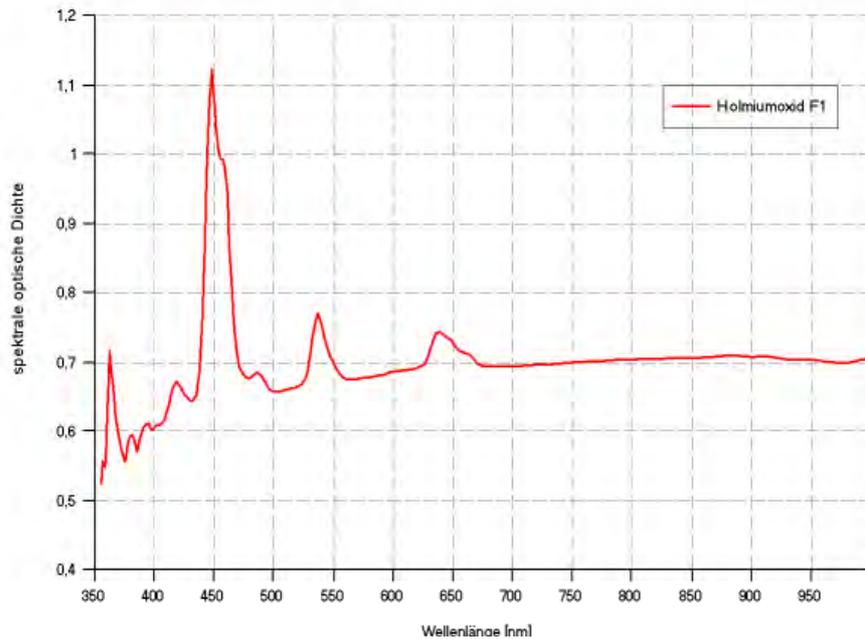


Abb. 5: Spektrale optische Dichte der Holmiumoxidküvette

Tabelle 1: Absorptionspeaks der Holmiumoxidküvette

Sollwerte von Holmiumoxid	Messwerte	Abweichungen
279 nm	(nicht messbar)	(nicht messbar)
361 nm	362 nm	-1 nm
453 nm	450 nm	+3 nm
536 nm	537 nm	- 1 nm
638 nm	639 nm	- 1 nm

Bei dem Vergleich der Werte ergibt sich eine absolute max. Abweichung von ca. 3 nm, die der vom Hersteller angegebenen Messauflösung entspricht.

Nach der Abszissenüberprüfung fehlt noch der Nachweis über die Ordinate also die Intensitätsgröße bei definierten Wellenbereichen. Die Messung der Küvetten (F2 bis F4) ergab folgendes Ergebnis:

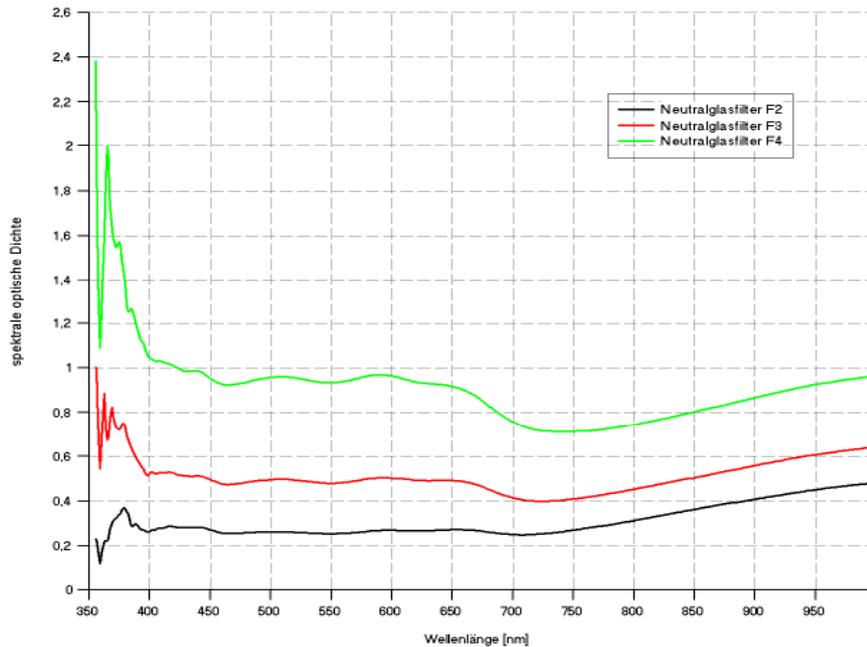


Abb. 6: Spektrale optische Dichte von Neutralglasfilter

Tabelle 2: Abweichungen der Neutralglasfiltermessungen

Wellenlänge	Istmessung			Abweichung		
	I(F2)	I(F3)	I(F4)	v(F2)	v(F3)	v(F4)
440	0,282	0,514	0,987	-0,014	-0,015	-0,023
465	0,255	0,474	0,923	-0,018	-0,017	-0,024
546	0,254	0,480	0,937	-0,016	-0,011	-0,011
590	0,268	0,506	0,972	-0,013	-0,006	-0,012
635	0,268	0,492	0,929	-0,013	-0,006	-0,014

Das Ergebnis ist über den gesamten sichtbaren spektralen Bereich (VIS) überzeugend und entspricht den Herstellerangaben. Es zeigt sich, dass der Einfluss der Lichtwellenleiter bei der Messung nicht vernachlässigbar ist, da alle Werte eine negative Abweichung aufweisen. Hierbei handelt es sich um eine systematische Abweichung, die im Mittel $-0,014$ entspricht, aber nicht signifikant ist. Versuche ergaben nach dem Einschaltvorgang der Lampe jedes Mal ein unterschiedliches Intensitätsbild. Dieser Umstand ergab nach einer Überprüfung keinen Genauigkeitsverluste bei der Bestimmung der spektralen optischen Dichte, da die Ausgangsstrahlung in die Berechnung einfließt (DIN5036).

4. Übertragung der Analysesystemverträglichkeit auf die Chlorophyllmessung im Labor

Umweltbedingter Stress, wie z.B. Lichtverhältnisse, Dürre, Nährstoffmangel oder auch überhöhte Schadstoffkonzentrationen, wirken sich negativ auf den Stoffwechselhaushalt der

Pflanze aus. Derartige Schädigungen können durch das Bestimmen von pflanzenphysiologischen Parametern nachweisen werden. Einer dieser pflanzenphysiologischen Parameter ist der Chlorophyllgehalt. Chlorophyll ist der grüne Farbstoff, der in allen höheren Pflanzen in den Chloroplasten, einem Zellbaustein der pflanzlichen Zelle, enthalten ist. Die Chlorophylle sind die photosynthetisch aktiven Pigmente, mit denen Pflanzen Lichtenergie in chemische Energie umwandeln. Bei den höheren Pflanzen findet man in erster Linie Chlorophyll a und b, das im Verhältnis von etwa 1:3 vorliegt. Bei einem stark verminderten Chlorophyllgehalt kann es zu äußerlich erkennbaren hellen Blattstellen an den Pflanzen kommen, die als Chlorosen bezeichnet werden. Über die Konzentration des Chlorophyllgehaltes in den Pflanzenblättern lassen sich Aussagen über die Stress - Situation der Pflanzen machen. Zur Bestimmung des Chlorophyllgehaltes wird ein Extrakt aus frischem Blattmaterial hergestellt. Dazu werden von den Pflanzen 0,1-0,2 g Frischmaterial in 5 ml Aceton eingebracht und für 1 min mechanisch aufgeschlossen (Ultra-Turrax T25). Anschließend wird der Pflanzenbrei auf 10 ml mit Aceton aufgefüllt, in ein Glaszentrifugenröhrchen überführt und 10 min bei 20000 g zentrifugiert, um die Zellfragmente abzusedimentieren. Der völlig klare, grüne Überstand, der alle Pigmente enthält, wird in eine Glasküvette abdekantiert und die Extinktion bei 645 und 662 nm gegen reines Aceton bestimmt. Der Chlorophyllgehalt wird nach der folgenden Formel berechnet:

(ARNON 1949) (PORRA 2002)

$$\begin{aligned}
 CHL(a) &= (11,75 * E_{662}) - (2,35 * E_{645}) \\
 CHL(b) &= (18,61 * E_{645}) - (3,96 * E_{662}) \\
 CHL &= CHL(a) + CHL(b)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Die Messung der Proben erfolgte einerseits an einem geeichten Laborphotometer: (Perkin Elmer UV/VIS Spektrometer Lambda 20) mit der Software UVWinlab und andererseits an dem Hyperspektralscanner der Firma TriOS.

Durch den Messaufbau und die obengenannten Formeln wurde folgendes Ergebnis erreicht:

Tabelle 3: Vergleich von Trios und Perkin Elmer

Nr.	CHL a (TriOS)	CHL b (TriOS)	CHL (TriOS)	CHL (Perkin)	v (absolut)	v (%)
1	10,66	3,95	14,61	15,35	0,74	4,82
2	5,10	2,09	7,19	7,23	0,04	0,59
3	2,61	0,88	3,50	3,61	0,11	3,16
4	17,33	7,25	24,58	26,20	1,62	6,19
5	20,90	9,27	30,17	32,98	2,81	8,52
6	3,72	1,98	5,70	5,23	-0,47	-8,95
7	6,53	2,91	9,44	9,58	0,14	1,49
8	23,34	12,39	35,72	38,70	2,98	7,69
9	18,78	7,73	26,51	28,32	1,82	6,41
10	23,93	12,94	36,88	40,89	4,02	9,82

Die erreichten Ergebnisse stimmen bei einer mittleren Abweichung von 4 % mit den Herstellerangaben der Firma TriOS überein. Signifikant scheint, dass bei steigendem Chlorophyllan-

teil in der Extinktion auch die prozentuale Abweichung zwischen den beiden Analysesystemen steigt. Dies ist auf eine Messschwäche des Laborphotometers bei hohen Intensitätswerten zurückzuführen. In diesem Bereich scheint der Trios-Sensor exaktere Werte zu liefern.

5. Ausblick

Weitere Entwicklungsmöglichkeiten liegen in einer noch stärkeren Integration von mobilen Messsystemen in den Laboralltag. Im speziellen soll außerdem eine Verifizierung von bekannten Algorithmen aus der Literatur bzw. neu entwickelter Algorithmen aus den Bereichen der Chlorophyll-, Protein- und Schwermetallbestimmung erfolgen. Ein weiteres Ziel ist die Übertragung der Messmethoden und Algorithmen auf die Reflexionsmessung (WIEGAND ET AL. 1991), die dann eine in-vivo Messung und Auswertung in Echtzeit erlaubt. Außerdem kann diese Methode die aufwändigen chemischen Laboranalysen verdichten oder gegebenenfalls ersetzen. Zusätzliche Daten mit geringem finanziellen und personellen Aufwand erlauben dann präzisere Aussagen.

6. Literaturverzeichnis

- ARNON, D.I., 1949: Copper enzymes in isolated chloroplasts, *Plant Physiol.* 24, 1-15
- DIN 5036 Teil I, 1978: Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien, Beuth Verlag GmbH Berlin Köln
- EUROPEAN ENVIROMENT AGENCY EEA, 2003: Europe's environment: the third assessment. Office for Official Publications of the European Communities
- EUROPEAN ENVIROMENT AGENCY EEA, 2002: Assessment of data needs and data availability for the development of indicators on soil contamination. Technical report No 81
- HORLER, D.N.H., DOCKRAY, M., BARBER, J., 1983: The red edge of plant leaf reflectance. *Int. J. Remote Sensing* 4: 273-288
- PORRA R.J., 2002: The chequered history of the development and use of simultaneous equations for the accurate determination of chlorophylls a and b. *Photosynthesis Research* 73
- WIEGAND, C.L., RICHARDSON, A.J., ESCOBAR, D.E., GERBERMANN, A.H., 1991: Vegetation indexes in crop assessments. *Remote Sensing of Environment.* 35: 105-119
- ZARCO, P.J, 1998: Optical Indices as Bioindicators of Forest Sustainability. Research Evaluation Course Report Number 1.

Vergleichende Informationsextraktion aus SAR- und optischen Bildern

PETER LOHMANN, KARSTEN JACOBSEN, KIAN PAKZAD, ANDREAS KOCH

Zusammenfassung: Im Rahmen eines laufenden Tests der EuroSDR unter Leitung der TU Berlin wird die Informationsextraktion topographischer Objekte aus flugzeuggestützten multi-polarisierten SAR Radaraufnahmen (C, X and L – Band) neuester Technologie mit der aus hoch auflösenden Luftbildern verglichen. Es sollen der Informationsgehalt einer visuellen Interpretation und Kartierung, einer automatischen Objektextraktion und von fusionierten Daten untersucht werden.

Hier werden die Ergebnisse der visuellen Interpretation von drei unabhängigen Bearbeitern mit unterschiedlicher Erfahrung verglichen. Alle Interpreten wurden anhand von Trainingsmaterial in die SAR spezifischen Abbildungseigenschaften (Radiometrie und Geometrie) eingewiesen.

Ein allgemeingültiger Bildinterpretationsschlüssel wurde zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse definiert. Um die Auswertung der SAR-Bilder nicht durch Vorinformationen zu beeinflussen, wurde die Interpretation am Bildschirm nur mit diesen durchgeführt, bevor die optischen Bilder für die Auswerter verfügbar waren. Die Objektextraktion erfolgte sowohl für linienhafte Objekte, wie Straßen und Eisenbahnstrecken oder Flüsse als auch für flächenhafte Objekte, wie landwirtschaftliche, Forst- oder Besiedlungsflächen. In ausgewählten Bereichen wurden auch Einzelgebäude kartiert um das volle Potenzial des Bildmaterials abschätzen zu können.

Beide Interpretationsergebnisse (SAR und optisch) wurden hinsichtlich ihrer Genauigkeit und Vollständigkeit verglichen, wobei die Luftbilder wegen fehlender Referenzdaten (z.B. Karten) als Soll gewählt wurden. Die Schwierigkeiten der Objektsprache durch die Interpreten werden ebenso wie die erreichten Ergebnisse präsentiert.

1. Introduction

Within an EuroSDR contest, organised by the Technical University of Berlin, a competitive information extraction is performed on both, state of the art airborne multi-polarized SAR imagery (see Table 1) and high resolution optical imagery of different terrain types.

Region	λ	Polarisation	Resolution
Trudering	X	none	1.5 m
Oberpfaffenhofen	L	lexicographic	3.0 m
Copenhagen	C	Pauli	4.0 m
Fjordhundra	C	Pauli	4.0 m

Table 1: SAR images used for the different test areas

The used data sets are described in detail by HELLWICH ET AL. 2002. The true-colour optical data available for each area was resampled to the pixel size of the corresponding SAR images. The optical images have been acquired at different dates than the SAR data, however the exact acquisition times were not provided.

The test is foreseen for three stages namely:

- visual interpretation
- automatic object extraction and
- extraction from sensor fused data

This paper will show some first results of the first stage, in which visual interpretation by on-screen digitizing had been performed. The interpretation achieved with the SAR images will be compared with the results based on optical images. Topographic maps have not been available, by this reason the optical images are used as reference. However each of the 3 interpreters used his own interpretation of the optical data as his own reference.

Region	Landscape Content
Trudering	Fairgrounds
Oberpfaffenhofen	Agriculture & Industry
Copenhagen	Residential & Industry
Fjordhundra	Agriculture & Forest

Table 2: Test sites and their characteristics

The 4 test sites (see Table 2) show a different terrain structure in terms of landscape contents, ranging from agricultural to rural and industrial.

Two of the interpreters do have a long year experience in interpretation of aerial photographs but not with SAR images.

2. Interpretation Procedure

As has been previously shown by ALBERTZ (1970) and SCHNEIDER (1974) the quality of image interpretation is very much affected by the experience of the interpreters (Fig. 1). This is especially true for SAR image interpretation because of totally different imaging characteristics.

Because of missing experience with interpretation of SAR images the interpreters were trained for the specialties of SAR by using a tutorial of CCRS and multifrequency SAR images together with topographic maps of an area not being part of this contest.

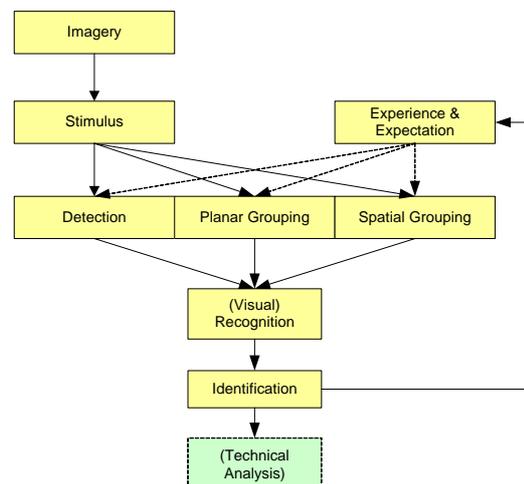


Figure 1: The Image Interpretation Process (ALBERTZ, 1970)

Ground pixel size of SAR images is considered to be of greater importance than different polarisation shown as colour. The pixel size differs for the test areas from 1.5 to 4.0m (Table 1). In the Trudering area no polarisation has been used, leading only to black and white SAR images. Some authors (OHLHOF ET AL., 2000) refer to the NATO Standard (STANAG 3769), recommending the appropriate ground pixel size for the detection, recognition, identification in some cases also technical analysis of image objects (Table 3), whereby the following definitions are used:

Object	Detection	Recognition	Identification	Technical Analysis
Terrain Features	~800m	90m	3m	0.75m
Urban Areas	60m	15m	3m	0.75m
Roads	6m	4.5m	1.5m	0.38m
Railroad	15m	4.5m	1.5m	0.38m
Bridges	6m	4.5m	1.5m	0.3m
Airfield Fascility	6m	4,5m	3m	0,15m

Table 3: Required ground pixel size for optical image interpretation (STANAG 3769)

Detection: In image interpretation, the discovering of the existence of an object without its recognition.

Recognition: The ability to fix the identity of a feature or object in images within a group.

Identification: The ability to place the identity of a feature or object on imagery as a precise type.

Technical Analysis: The ability to describe precisely a feature, object or component imaged.



Figure 2: Comparison of optical and SAR images



Figure 3: (1) - optical image; (2) - Interpretation of optical image; (3) - SAR-image; (4) - Interpretation of SAR image

Although STANAG 3769 does not discriminate colour or black and white imagery as well as contrast, it gives an indication of the expected details which may be extracted from imagery. The work being carried out in this investigation can be allocated to the detection, recognition and sometimes also identification tasks in image interpretation, while the technical analysis is something of more military nature.

Considering these facts and the experiences of the interpreters a list of common objects was set up prior to the interpretation in order to ensure comparable results. Altogether 45 object

types have been defined as common features although each interpreter also had some personal features. Some of these features have been selected for a detailed analysis separated for linear and planar (area) object types.

At first the interpretation was made just with the SAR images to avoid an influence of the higher information contents of the optical images. Then the optical imagery was interpreted using the same object types as for SAR. In some cases this was leading to totally different results. For example the radar image of Trudering showed a historical site which was considered a specified object type but could not be detected at all within the optical imagery (Figure 2). The reason is not known but might be caused by the different acquisition times. The analysis was carried out for all 4 test sites and resulted in a data set for each of the operators as shown in Figure 3.

In addition to these interpretations the interpreters were asked to appraise the SAR data quality for interpretation. The result for the main categories is summarized in the following:

Roads: In open areas recognised in general well while it was difficult in the built up areas.

Highways: Recognition and in most cases also identification (number of lanes etc.) is possible.

Railroad: Detection and recognition was possible, but sometimes confusion with roads occurred.

Development: Built up areas could be recognized well (identification of large buildings is possible, but small buildings only could be recognised).

Agricultural areas: Appear in unusual colours (as compared to optical data). A good identification or separation between arable and grass land was impossible.

Ponds: Good identification was given in most cases but difficulties with smaller ones.

Forest: Good detection and recognition, but clear identification of forest type is not possible.

Figure 4 (see annex) shows as an example the 3 different interpretation results (SAR and optical data) for the Copenhagen region obtained by the 3 operators.

It is remarkable that only one interpreter was able to identify the golf course, while the other marked this area as undefined. It can be seen also, that the amount of roads and the areas identified as developed differ quite remarkable.

For this reason an investigation on the completeness and correctness of the interpreted features was performed.

3. Evaluation of Interpretation Results

As already mentioned in section 1 neither ground truth nor reference data was available to check the quality and completeness of the interpretation results. Because of the extensive know-how and experience of the 3 interpreters with aerial imagery and also the higher information contents, the optical images have been used as reference. The interpretation of the SAR imagery was checked against the interpretation of the optical imagery for each interpreter individually. The use of a single interpretation of optical imagery alone was

thought not to be sufficient, since the way an operators address image objects is varying individually.

For each of the 4 regions and for each operator the interpreted SAR imagery was checked against the interpretation of the optical data (see Figure 5 in annex).

As the interpretation was done by on-screen digitizing using the Arc/View software, the length and area of objects could be computed.

The analysis was done exemplarily for linear objects like highways, roads and railways and planar objects like development, agricultural, pond and forest areas. The SAR interpretation has been compared with the optical interpretation. For linear objects both were compared (buffered) visually (i.e. checked if the lineaments belong to the same object) and the length of the objects was computed for the optical and the SAR data in the common buffer area. In addition the length computation has been done separately for objects appearing in either the optical data or SAR data only. A similar approach was used for planar features, which were intersected. Buildings however were very often found at a position, where intersection would yield wrong results, because of the different geometric behaviour of the data sets. Therefore instead of the building areas only the “building position” was used, which means that the compliance of buildings in the optical and SAR interpretations was checked.

For each object type the completeness and correctness of the interpretation was computed following an approach presented by WIEDEMANN (2003).

This approach is illustrated in Figure 6.

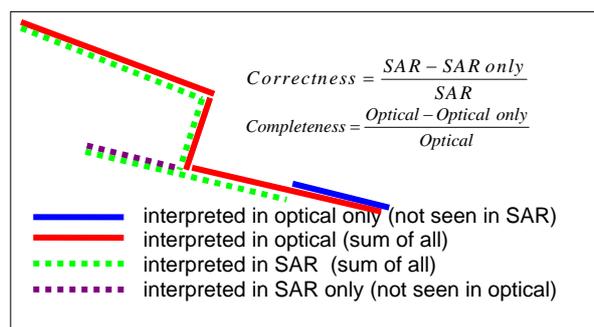


Figure 6: Definition of Completeness & Correctness for linear objects

The correctness (range 0.0 up to 1.0) is the percentage of correctly interpreted line / planar features i.e. the percentage of the interpretation of the SAR images, which is in accordance with the reference (interpretation of the optical data).

The completeness (range 0.0 up to 1.0) represents the percentage of the reference data which is explained by the interpreted SAR data, i.e. the percentage of the optical interpretation which could be interpreted from the SAR data. The computation according to Figure 6 is done by using the length in case of linear objects and the area in case of planar object.

The results of selected object types together with the range of the computed values for the 3 interpreters and the 4 test sites are shown in figures 7 to 10.

Fjordhundra is a region of agricultural structure. Therefore no highways or railroads (as in the Copenhagen scene) exist in this image. In case of roads the difference between the minimum and maximum value of completeness for roads in this area is quite big. Again at a ground pixel size of 4m in an agricultural area it is not easy to differentiate between a land use boundary and a small road. However the correctness value of the found roads is satisfactory.

The completeness and correctness of linear objects like highways and roads in the other areas is quite high and also the variation of the interpreted results is moderate. Only one interpreter detected the railroad in the Oberpfaffenhofen area, while the others recognized it as road.

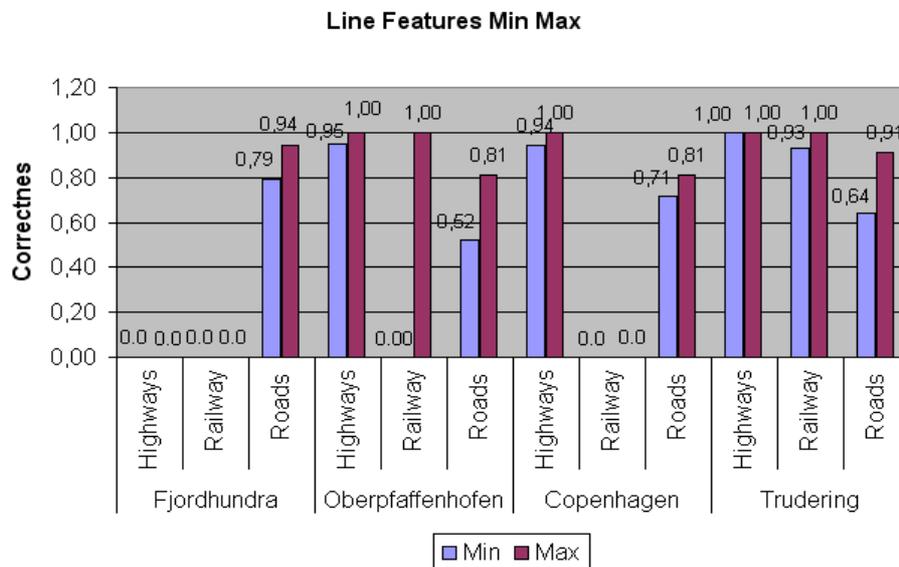


Figure 7: Correctness of line features highways, railways and roads

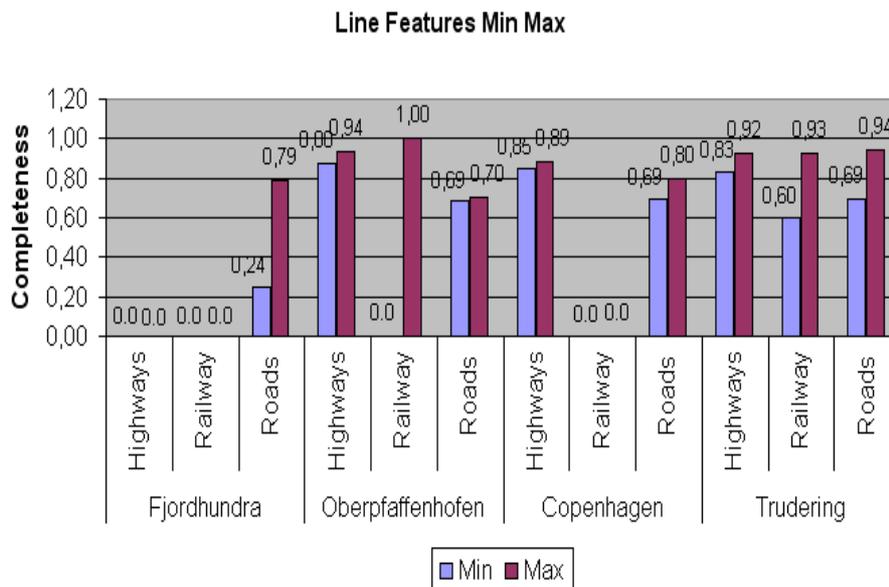


Figure 8: Completeness of line features highways, railways and roads

Figure 9 and 10 show the completeness and correctness of the interpretation of planar features. The interpretation within the 4 regions shows more or less a comparable quality. However for the feature “developed areas” within the Oberpfaffenhofen region a remarkable difference between the minimum and maximum value of correctness can be observed. This is due to a wrong feature declaration within the SAR image interpretation. Some areas of the airport have been declared as developed in the optical image and as airfield area in the SAR image. In the test area Fjordhundra ponds do show a small value for completeness and correctness due to the fact that the existing ponds are very small, and within the optical data their colour does not allow a good recognition and identification. The development areas in that region are difficult to be identified because of insufficient spatial resolution.

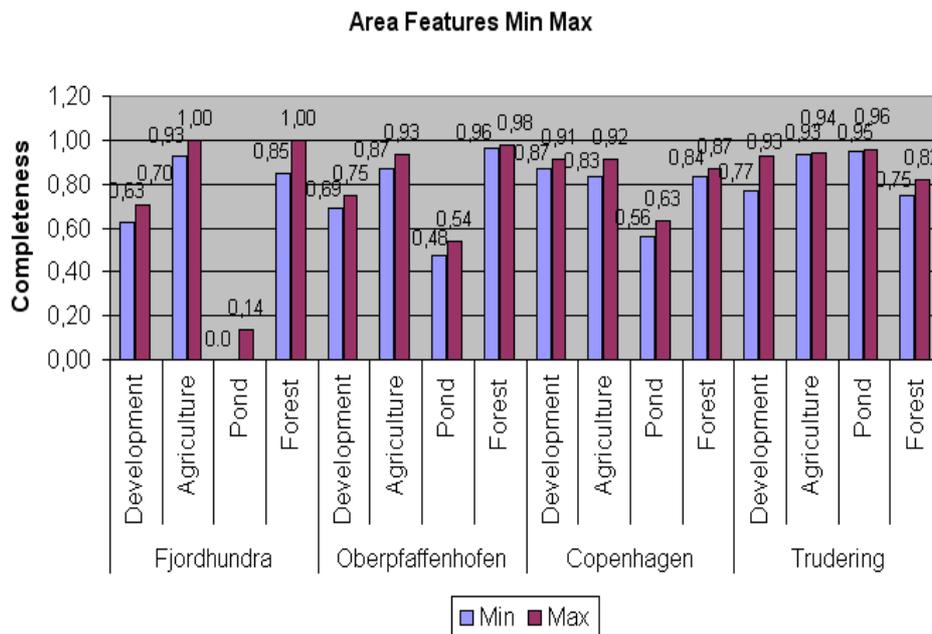


Figure 9: Completeness of area features development, agriculture, pond, forest

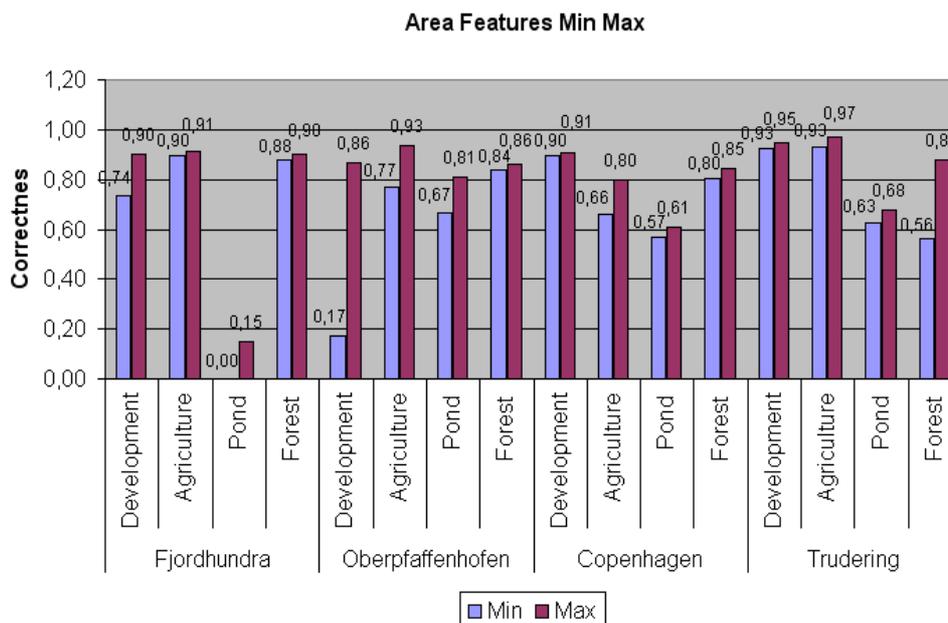


Figure 10: Correctness of area features development, agriculture, pond, forest

4. Conclusions

In general all of the line and area features could be interpreted quite well. Difficulties could be observed with small objects like ponds in agricultural / forest type areas and in the recognition of railways in one of the investigated regions. Although the presented results seem to be quite satisfactory, the major drawback of this investigation is that no exact reference (topographic map or equivalent) was available for the analysis. Therefore one has to consider uncertainties which originate from facts like multiple meaning of some found features in the interpretations. In this way the same linear object may have been interpreted as a boundary or

a creek or a path. Without having a correct reference it is impossible to identify such objects as of the correct type or not.

The analysis of the interpretation results against map data will be part of the function of the organizer of this test. In the next stage of this contest automatic methods of image analysis and interpretation will be used.

5. Acknowledgements

We would like to express our thanks to the providers of the test data, especially

- Intermap Corp. and Bayr. Landesvermessungsamt München for data from Trudering area
- DLR-IHR for the Oberpfaffenhofen data
- DDRE, Copenhagen and Lantmateriet, Sweden for the Fjordhundra data set
- DDRE, Copenhagen and Kampsax A/S, Hvidovre for the data over Copenhagen city

Further thanks belong to the group of interpreters, namely

A. Elmhorst, U. Wissmann and B. Pollmann not only for performing the actual interpretations, but also for many fruitful discussions.

6. References

- ALBERTZ, J.: Sehen und Wahrnehmen bei der Luftbildinterpretation, BuL, 38. Jg., H.1,1970
- HELLWICH, O. REIGBER, A. AND LEHMANN, H.: "Sensor and Data Fusion Contest: Test Imagery to Compare and Combine Airborne SAR and Optical Sensors for Mapping", Proceedings of IGARSS'2002, Toronto, pp. 82-84, 2002
- OHLHOF, T., EMGE, T., REINHARDT, W., LEUKERT, K., HEIPKE, C. & PAKZAD, K.: Generation and Update of VMAP Data using Satellite and Airborne Imagery, IntArchPhRS (33) B4/2, 762-768, Amsterdam 2000
- SCHNEIDER, S.: Luftbild und Luftbildinterpretation XI, Walter de Gruyter Berlin -New York - 1974, ISBN 3 11 002123 4
- STANAG 3769: Minimum resolved object sizes and scales for imagery interpretation, AIR STD 80/15, Edition 2,HQ USAF/XOXX(ISO) Washington D.C. 20330-5058, 1970
- WIEDEMANN, CH., 2003: External Evaluation of Road Networks, ISPRS Archives, Vol. XXXIV, Part 3/W8, Munich, 17.-19. Sept. 2003, pp. 93-98
- CCRS: http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/tutorials/stereosc/chap5/chapter5_1_e.html

7. Annex

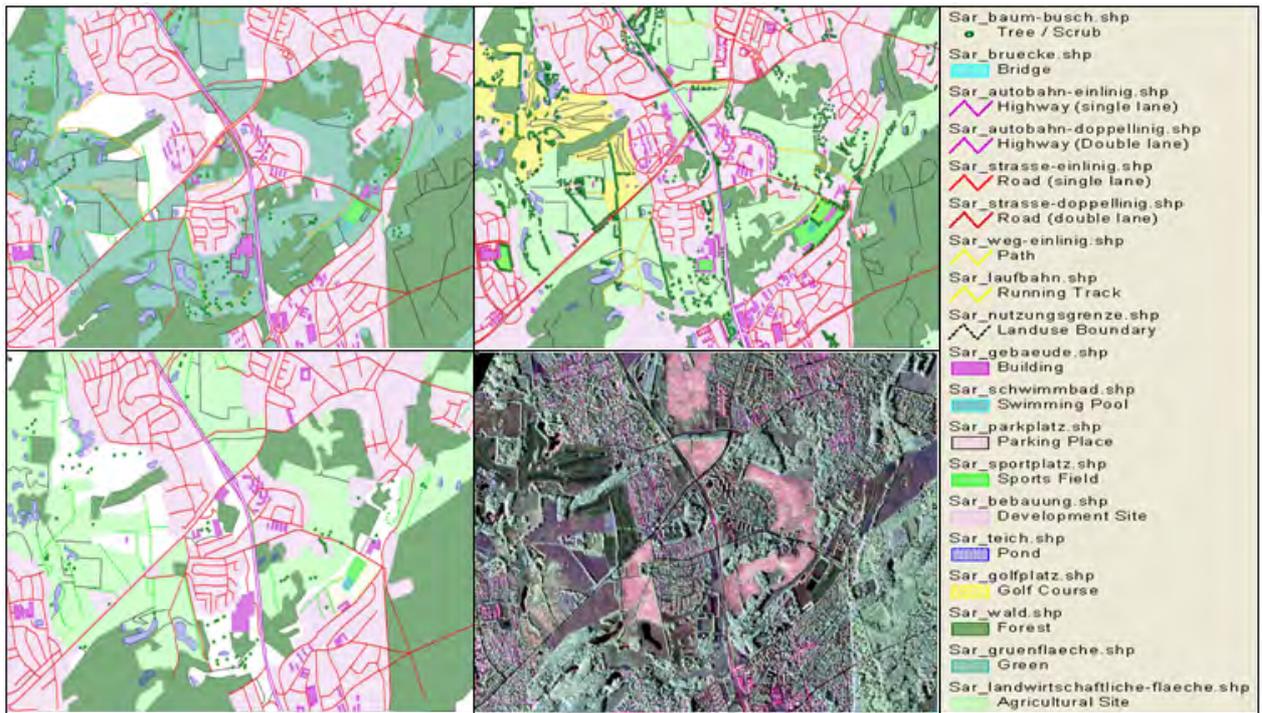


Figure 4: SAR interpretation Copenhagen



Figure 5: Comparison of interpretations

Top:

Bottom:

Optical image

SAR image

Anlagen

Anlage 1: KNÖPPEL, A. & PIETZSCH, T.: Vergleich von Bündelblockausgleichung und sequentieller relativer Orientierung von Bildtripeln zur Roboterpositionierung

Anlage 2: KUHN, R.W., MICHAELIS, B., CALOW, R., KASZUBIAK, M. & TORNOW, M.: Echtzeitfähiger Multipositionierungssensor

Vergleich von Bündelblockausgleichung und sequentieller relativer Orientierung von Bildtripeln zur Roboterpositionierung

ANKE KNÖPPLER* & TOBIAS PIETZSCH†

Zusammenfassung: Die Selbstlokalisierung und Navigation sowie die Kartenerstellung sind grundlegende Probleme in der mobilen Robotik. Unter Verwendung von entfernungs-messenden Sensoren wie Laser-Rangefinder und mit Hilfe von Verfahren, die einen wahr-scheinlichkeitstheoretischen Ansatz verfolgen, sind wir gegenwärtig in der Lage, gitterba-sierte Karten in 2D und 3D zu erstellen. Mit der Verfügbarkeit der nötigen Rechenleistung gewinnen in diesem Anwendungsbereich auch bildbasierte Verfahren nach dem Prinzip „Structure from Motion“ zunehmend an Bedeutung. Allerdings ist bisher noch nicht aus-reichend geklärt, welche dieser Verfahren den Anforderungen gerecht werden und wie die Daten der verschiedenen Sensortypen integriert werden können. Wir haben ein auf sequentieller relativer Orientierung von Bildtripeln basierendes Verfahren auf einem mo-bilen Roboter in einer natürlichen Büroumgebung angewendet und mit den Ergebnissen einer Bündelblockausgleichung verglichen. Dabei wurden insbesondere die Genauigkeit und Zuverlässigkeit dieser beiden Verfahren sowie deren Anwendbarkeit innerhalb der Steuerungsumgebung des Roboters untersucht.

1 Einleitung und Motivation

Die Forschung in der mobilen Robotik hat in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte bei der Lösung von grundlegenden Problemen gemacht. Es wurden Verfahren entwickelt, mit denen sich Roboter, die mit Laser-Rangefindern ausgerüstet sind, in Innenräumen unter Verwen-dung einer vorgegebenen Karte selbst lokalisieren können, z. B. (THRUN ET AL. 2000), oder alternativ dazu gitterbasierte Karten in 2D oder 3D selbst erstellen können und diese Karten gleichzeitig zur Positionierung nutzen, z. B. (MONTEMERLO ET AL. 2002). Allerdings kann man nicht davon ausgehen, dass alle mobilen Plattformen mit einem Laser-Rangefinder aus-gestattet sind. Mit der Verfügbarkeit der nötigen Rechenleistung haben deshalb bildbasierte Verfahren zur Positionsschätzung an Bedeutung gewonnen. Besonders Verfahren nach dem Prinzip „Structure from Motion“ (SFM) finden in der Robotik zunehmend Interesse. In un-serer Studie stellen wir ein SFM-Verfahren zur Roboterpositionierung vor und vergleichen es mit den Ergebnissen einer Bündelblockausgleichung. Es soll untersucht werden, ob beide Ver-fahren in der Robotik angewendet werden können. Es soll auch geklärt werden, wie man diese Ansätze mit den vorhandenen Lokalisierungsmethoden aus dem Bereich der Künstlichen In-telligenz kombinieren kann, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Positionsschätzung zu erhöhen.

*Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden, 01062 Dresden,
E-Mail: Anke.Knoeppler@mailbox.tu-dresden.de

†Institut für Künstliche Intelligenz, Fakultät Informatik, TU Dresden, 01062 Dresden,
E-Mail: Tobias.Pietzsch@inf.tu-dresden.de

Im vorhinein ist nicht offensichtlich, welche bildbasierten Verfahren für den Einsatz auf autonomen mobilen Sensorplattformen geeignet sind. Die benötigten Verfahren müssen echtzeitfähig sein, was gegen die Verwendung aufwendiger iterativer Schätzverfahren, wie der Bündelblockausgleichung, spricht. Auf der anderen Seite sind einfachere sequentielle Verfahren oft durch eine ungünstige Fehlerfortpflanzung geprägt. Das von uns gewählte Verfahren basiert auf einer sequentiellen relativen Orientierung von Bildtripeln. Es ist zeiteffizient, aber nicht notwendigerweise genau und robust auf längeren Distanzen. Im Gegensatz dazu ist eine Anwendung einer Bündelblockausgleichung verhältnismässig rechenaufwendig, lässt aber optimale Ergebnisse hinsichtlich Genauigkeit und Zuverlässigkeit erwarten (CHIUSO ET AL. 2002).

Wir geben einen kurzen Überblick über Sensorik und Positionierungsverfahren in der Robotik in Abschnitt 2. Das verwendete sequentielle Schätzverfahren ist in Abschnitt 3 beschrieben, die Bündelblockausgleichung in Abschnitt 4. Es folgt eine Zusammenfassung der Implementierung in Abschnitt 5. Die experimentellen Ergebnisse sind in Abschnitt 6 beschrieben. Wir schließen unsere Betrachtungen in Abschnitt 7 ab.

2 Positionierungsverfahren in der mobilen Robotik

Die Sensorik eines autonomen mobilen Roboters besteht in der Regel aus entfernungs-messenden Sensoren (Ultraschallsensoren oder Laser-Rangefinder) und visuellen Sensoren (Kameras). Die Informationen, die der Roboter von seinen Sensoren erhält, sind häufig fehlerbehaftet und unvollständig, was zu einer hohen Unsicherheit bei der Wahrnehmung der Umgebung führt, welche durch die entsprechenden Lokalisierungs- bzw. Erkennungsverfahren kompensiert werden muss.

Koppelnavigation. Die Eigenbewegung des Roboters wird in der Regel über Winkelgeber erfasst und in Translations- und Rotationsbewegungen umgerechnet (Wegintegration, Odometrie, Dead Reckoning). Während dieses Verfahren über kurze Entfernungen sehr präzise ist, weist es über längere Distanzen erhebliche Fehler auf. Systematische Fehler, die u. a. durch fehlerbehaftete Raddurchmesser auftreten, werden durch eine manuelle Kalibrierung der Winkelgeber begrenzt. Zufällige Fehler, u. a. verursacht durch das Gleiten der Räder auf dem Untergrund, werden als normalverteilt angenommen, wobei die Varianz von der jeweiligen Bewegung des Roboters abhängig ist (KONOLIGE 2001). Typische Parameter für einen mobilen Roboter vom Typ Pioneer 2 DX sind: 1 cm Entfernungsfehler auf einer Strecke von 1 m; 8° Fehler in der Bestimmung der Orientierung bei einer vollen Drehung auf der Stelle, 1° seitliche Drift des Roboters bei einer Vorwärtsbewegung von 1 m.

Lokalisierung mit entfernungsmessenden Sensoren. Die ungünstige Fehlerfortpflanzung in der Messung der Eigenbewegung macht es nötig, die Roboterposition in regelmäßigen Abständen durch Messungen des Abstandes zu Objekten in der Umgebung zu korrigieren (Positionsverfolgung, Position Tracking). Ultraschallsensoren haben, wenn sie sich in einen günstigen Winkel zum Objekt befinden, eine Genauigkeit von 5 cm. Ist der Winkel zum reflektierenden Objekt jedoch kleiner als 70°, entstehen stark fehlerhafte Messungen. Die verwendeten Laser-Rangefinder werden häufig in einer Betriebsart benutzt, in der man Messungen bis 8 m mit einer Winkelauflösung von 0.5° und einer Genauigkeit von 5 mm erhält. Allerdings können auch hier durch Reflektionen und an Glasoberflächen größere Fehler auftreten. Die Mehrzahl der erfolgreichen Verfahren zur Positionsverfolgung mit dieser Art von Sensoren

verfolgt einen wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansatz. Unter Verwendung von probabilistischen Sensormodellen wird die aktuelle Positionsschätzung nach der Bayesschen Regel in regelmäßigen Abständen aktualisiert (THRUN ET AL. 2000).

Obwohl diese Verfahren hinsichtlich ihrer Genauigkeit und Zuverlässigkeit den in der Robotik gestellten Anforderungen zur Positionierung gerecht werden, gibt es ein grundsätzliches Interesse, auch bildbasierte Entfernungsmessungen in diesen Prozess mit einzubeziehen. Erstens können wir nicht davon ausgehen, dass alle mobilen Plattformen mit einem Laser-Rangefinder ausgestattet sind. Zweitens gibt es Situationen in denen ein Laser-Scanner nicht mehr zu Lokalisierung verwendet werden kann, weil sein Gesichtsfeld durch dynamische Objekte, z. B. Personen, verstellt ist. Drittens würde die Verwendung von bildbasierten Verfahren die automatische Erstellung von 3D-Karten erleichtern. Darüberhinaus könnten bildbasierte Verfahren eine größere Genauigkeit in der Schätzung der aktuellen Orientierung des Roboters erreichen, als das mit Kompassen, Ultraschallsensoren oder Laser-Rangefinder gewöhnlich möglich. Zu beachten ist auch der Kostenvorteil von Kameras gegenüber von Laser-Rangefindern.

Bildbasierte Lokalisierungsverfahren. Unter der Vielzahl von kamerabasierten Verfahren zur Roboterpositionierung können wir grundsätzlich unterscheiden zwischen denen, die ein bestimmtes Wissen über die Umgebung voraussetzen, und denen, die dieses Vorwissen nicht benötigen. Beispiele für den ersten Fall sind Verfahren, die Passpunkte verwenden, z. B. (BETKE & GURVITS 1997), Verfahren in denen die Roboterposition über einen Vergleich des aktuellen Bildes mit referenzierten Einträgen einer Bilddatenbank bestimmt wird, z. B. (WOLF ET AL. 2002), oder modellbasierte Ansätze, bei denen im Bild sichtbare Elemente einer 3D-Karte der Roboterumgebung verwendet werden, um den Positionierungsfehler bzw. die Roboterposition relativ zum Modell zu bestimmen, z.B. (FICHTNER & GROSSMANN 2003). Gänzlich ohne Vorwissen arbeiten Verfahren, in denen die Roboterposition nach dem SFM-Prinzip bestimmt wird, z. B. (CHIUSO ET AL. 2002). Welches dieser Verfahren ausgewählt wird, hängt in erster Linie von der jeweiligen Roboteranwendung ab. Wir werden uns im Folgenden mit SFM-Verfahren beschäftigen, weil wir neben der Selbstlokalisierung auch das Kartenerstellen als besonders wichtig für autonome, mobile Systeme ansehen.

Integration verschiedener Sensortypen. Da wir davon ausgehen müssen, dass sowohl Kamerabilder, Odometriedaten als auch Entfernungsmessungen mit Ultraschallsensoren und Laser-Rangefinder fehlerbehaftet und in realen Bedingungen unzuverlässig sind, sollte man versuchen, die Messungen der verschiedenen Sensoren gleichzeitig zu berücksichtigen, um die Genauigkeit der Positionsschätzung als auch deren Zuverlässigkeit zu erhöhen. In der Robotik verwendet man dafür den oben genannten Bayesschen Ansatz. Mit diesem Ansatz ist es relativ einfach, verschiedene Messungen zu integrieren, wenn man davon ausgehen kann, dass die Messungen der einzelnen Sensoren voneinander statistisch unabhängig sind, wovon für kamerabasierte Messungen und Odometrie- bzw. Entfernungsmessungen ausgegangen werden kann. Die bildbasierten Messungen könnten mit den Entfernungsmessungen integriert werden, wenn es gelänge, entsprechende probabilistische Sensormodelle zu entwickeln (FICHTNER & GROSSMANN 2003).

3 Sequentielle relative Orientierung von Bildtripeln

Während bestimmte Aufgaben, wie beispielsweise das Kartenerstellen, offline mittels aufgezeichneter Daten durchgeführt werden können, sind andere, wie die Navigation, ständig

auf aktuelle Daten angewiesen. Hier ist es von Vorteil, wenn zur Positionsbestimmung ein Online-Verfahren eingesetzt wird. Im Gegensatz zur Bündelblockausgleichung, wo alle Bilder einer Sequenz simultan orientiert werden, erfolgt bei der sequentiellen relativen Orientierung von Bildtripeln die Positionsbestimmung inkrementell, so dass für jedes Bild eine Positionsschätzung anhand der bis zu diesem Punkt gesehenen Teilsequenz geliefert wird.

Das Verfahren basiert darauf, zunächst Paare aufeinanderfolgender Bilder zu orientieren, die rekonstruierten Kamerapaare dann zu Tripeln und diese wiederum zu einem kompletten Pfad zusammenzufügen. Mit jedem neu verfügbaren Bild wird ein weiteres Tripel an den Pfad angehängt. Dabei wird von einer kalibrierten Kamera ausgegangen. Zur Orientierung der Bildpaare erfolgt die Bestimmung der aus der Bildverarbeitung bekannten Essential Matrix mit Hilfe des 8-Punkt-Algorithmus (HARTLEY & ZISSERMAN 2000). Aus dieser wird die relative Orientierung berechnet (HORN 1990). Dies erfolgt bis auf Skalierung mit einem unbekanntem Faktor. Mit Hilfe korrespondierender Punkte in drei Bildern kann jedoch das Verhältnis dieser Abstände zwischen zwei aufeinanderfolgenden Kamerapaaren bestimmt werden. Die auf diese Weise erhaltenen Bildtripel überlappen sich jeweils in einem Bildpaar und lassen sich somit leicht zu einem Pfad zusammenfügen.

Der globale Maßstab des errechneten Pfades ist zunächst unbekannt. Um ihn zu bestimmen, werden absolute Entfernungsmessungen benutzt, die durch Lasertracking (ARRAS & SIEGWART 1997) oder vorhandene Objektinformationen gewonnen werden. Unter der Annahme, dass sowohl die errechneten Längenverhältnisse als auch die Lasermessungen fehlerbehaftet sind, erfolgt die Integration mittels Least-Squares-Minimierung des globalen Fehlers. Dadurch wird auch der ungünstigen Fehlerfortpflanzung entgegengewirkt, die aus der Aneinanderreihung von Bildtripeln resultiert.

Als nächster Schritt ist die Integration eines Feature-Trackers zur automatischen Bestimmung von Korrespondenzen vorgesehen. Allerdings stellt dies auch eine weitere Fehlerquelle dar. Zur Behandlung von Ausreißern in den automatisch gewonnenen Korrespondenzdaten soll ein robustes Schätzverfahren, wie z. B. RANSAC (FISCHLER & BOLLES 1987), eingesetzt werden.

4 Bündelblockausgleichung

Die Bündelblockausgleichung stellt ein etabliertes Verfahren der Photogrammetrie zur simultanen Bestimmung der Orientierungsparameter von fast beliebig vielen Bildern und von Neupunktkoordinaten dar. Sie bildet damit eine Grundlage für eine hochwertige 3D-Objektmodellierung. In der Anwendung des Ansatzes in der autonomen Robotik kommt auch dem Aspekt der Überbrückung passpunktloser Räume eine große Bedeutung zu. Sie erlaubt ferner die Simultankalibrierung von robotergetragenen Kameras. Durch die in den meisten Implementationen vorgesehene Möglichkeit der Integration von Distanz- oder Positionsmessungen stellt sie außerdem eine Basis für die Sensorfusion dar.

Als nachteilig ist zu betrachten, dass die Erhöhung der Genauigkeit durch simultane Ausgleichung eines Blocks von Bildern mit einem Verlust an Echtzeitfähigkeit einhergeht. Als eine Lösung für diese Einschränkung wird in der Literatur die Verwendung einer Online-Triangulation auf der Basis von sequentiellen Schätzern genannt (GRUEN & KERSTEN 1995), wobei ein Normalgleichungssystem zunächst mit jedem neuen Bild aufdatiert wird und eine komplette Neuberechnung nur in größeren Abständen nötig wird.

5 Realisierung

Die bildbasierten Verfahren müssen in die jeweilige Systemarchitektur des mobilen Roboters integriert werden. Diese Architekturen sind in der Regel modular aufgebaut, wobei die Daten zwischen den einzelnen Modulen mit Hilfe spezieller Echtzeit-Kommunikationsprotokolle ausgetauscht werden. In unserer Implementation kann das Steuerprogramm des Roboters anweisen, dass ein Kamera-Bild aufgenommen wird, welches dann zusammen mit der aktuellen Positionsschätzung entsprechend der Odometrie und der Kamerakonfiguration (Pan, Tilt) abgespeichert bzw. an das jeweilige Bildverarbeitungsmodul übergeben wird.

Das Verfahren zur Orientierung von Bildtripeln wurde mit Hilfe der frei verfügbaren Gandalf-Bibliothek (MCLAUHLAN 2003) implementiert. Diese Bibliothek wurde gewählt, weil sie überschaubar und ausgereift ist. Sie bietet alle benötigten Grundwerkzeuge, von Routinen zur linearen Algebra bis hin zur Bildverzerrung. Erweitert um ein Modul zum Feature-Tracking läßt sich die Implementation problemlos in die Architektur der Robotersteuerung eingliedern. Als Bündelblockausgleichungsprogramm wurde Orient vom Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien gewählt (KAGER 1989). Neben der photogrammetrischen Punktbestimmung bietet Orient auch die Möglichkeit Entfernungs- und Richtungsmessungen sowie odometriebasierten Positions- und Orientierungsschätzungen in eine geodätischen Netzausgleichung einzubinden. Das Programm lässt sich in die Robotersteuerungsumgebung einpassen. Mit seinen umfangreichen Funktionen zur photogrammetrischen Modellierung bietet das Programm neben der Bestimmung der Roboteravigation ebenfalls die Möglichkeit das gewonnene 3D Modell der durchfahrenen Umgebung zu erweitern.

6 Ergebnisse

Wir haben die Genauigkeit der beiden Verfahren in verschiedenen Experimenten getestet. Zunächst haben wir untersucht, welche Positionierungsgenauigkeit mit den Verfahren erzielt werden kann. Daraus soll abgeleitet werden, ob eine Verbesserung der auf Odometriedaten basierenden Positionsschätzung mit diesen Methoden möglich und sinnvoll ist. Die Experimente wurden im Institut für Künstliche Intelligenz der TU Dresden durchgeführt. Der verwendete Roboter, ein Pioneer 2 DX, ist mit Ultraschallsensoren und einer Kamera SONY EVI D30 ausgerüstet. Die Position des Roboters wurde durch Koppelnavigation bestimmt. Für die Untersuchungen haben wir drei unterschiedliche Testszenarien ausgewählt. Experiment 1: Um die beiden Verfahren auf ihre Kompatibilität zu prüfen haben wir zunächst eine halbkreisförmige Fahrt des Roboters mit nach vorn gerichteter Kamera simuliert. Experiment 2: Der Roboter fährt mit nach vorn gerichteter Kamera einen Korridor entlang. Experiment 3: Der Roboter umfährt ein Objekt, wobei die Kamera nach innen auf das Objekt gerichtet ist. Während der praktischen Experimente wurden im Abstand von 20 cm (Experiment 2) bzw. 10° Bilder aufgenommen (s. Abb. 1). Mit den Bildern wurde die Roboterposition und Orientierung laut Odometrie und die aktuelle Pan/Tilt-Ausrichtung der Kamera aufgezeichnet. Die Herstellung der Punktkorrespondenzen erfolgte noch manuell. Damit sollten fehlerhafte Punktzuweisungen als Fehlerquelle zunächst ausgeschaltet werden, bevor die Arbeiten unter Verwendung von Verfahren der Merkmalsextraktion in Bildsequenzen fortgesetzt werden. Der Datenumfang der Experimente betrug 1436 Neupunkte und 42 Kamerapositionen in Experiment 1, 161 Neupunkte und 14 Kamerapositionen in Experiment 2 und 153 Neupunkte



Abb. 1: Typische Aufnahmen beim Entlangfahren des Korridors bzw. Umfahren des Objekts.

	Bildtripel			Bündelblockausgleichung					
	t [s]	Δ_{XY} [m]	Δ_{α} [gon]	t [s]	Δ_{XY} [m]	Δ_{α} [gon]	m_{XY} [m]	m_{XYZ} [m]	m_{α} [gon]
1	1.131	0.081	-0.720	105	0.011	-0.712	0.325	0.427	2.069
2	0.148	0.665	-0.425	10	0.305	0.365	0.056	0.058	1.594
3	0.319	0.454	22.649	7	0.066	0.624	0.034	0.036	0.561

Tab. 1: Vergleichende Darstellung der Ergebnisse der einzelnen Experimente

und 37 Kamerapositionen in Experiment 3.

Die Ausgleichung der Bilddaten mit der Bündelblockausgleichung erfolgte in einer freien Netzausgleichung von Bildmessungen, Neupunktskoordinaten, Kamerapositionen und -orientierungen. Außerdem erfolgte eine Simultankalibrierung der Roboterkamera. Schließlich wurde die berechnete Trajektorie mit einer ebenen Ähnlichkeitstransformation an die Odometriemessungen angepasst und an die erste Roboterposition angehängt.

In der sequentiellen relativen Orientierung von Bildtripeln wurden die aus den Punktkorrespondenzen berechneten relativen Positions- und Richtungsänderungen mit absoluten Entfernungsmessungen zu einem Pfad kombiniert. Dabei wurde nur Drehung des Roboters in der XY -Ebene berücksichtigt.

In Tab. 6 sind die Ergebnisse der Auswertung dargestellt. Die Spalten 2 und 5 enthalten Richtwerte für die Laufzeiten, t , der Berechnungen. In den Spalten 3, 4 sowie 6 und 7 ist die Abweichung der berechneten Positionslösungen zur Odometrielösung in der Lage Δ_{XY} und der Orientierung Δ_{α} aufgeführt. In den Spalten 8 bis 10 wird der mittlere Fehler der berechneten Kamerapositionen in der XY -Ebene m_{XY} , im Raum m_{XYZ} sowie in der Orientierung in der XY -Ebene m_{α} angegeben. Eine Visualisierung der Ergebnisse ist in Abbildung 2 dargestellt.

Bereits ohne eine genauere Analyse der Rechenzeiten wird der entscheidende Vorteil des sequentiellen Verfahrens gegenüber der Bündelblockausgleichung in dieser Hinsicht deutlich. Ebenfalls ersichtlich ist das höhere Genauigkeitspotential der Bündelblockausgleichung. Allerdings hat das sequentielle Verfahren bei in Fahrtrichtung ausgerichteter Kamera eine ähnliche Genauigkeit wie die Bündelblockausgleichung. Deutliche Vorteile hat die Bündelblockausgleichung bei Experiment 3. Die günstigere Strahlenschnittgeometrie und eine ungünstige Fehlerfortpflanzung der verwendeten SFM-Methode sind die Ursachen für diesen deutlichen Unterschied.

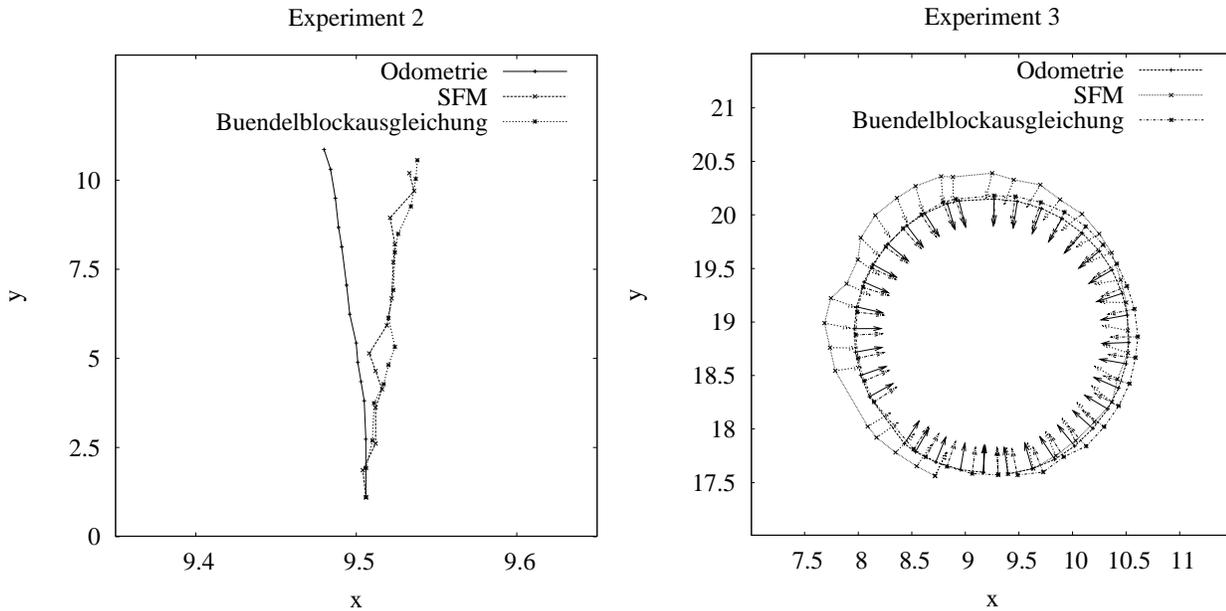


Abb. 2: Rekonstruierte Robotertrajektorie für die Experimente 2 und 3

7 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass mit beiden Verfahren eine Rekonstruktion der Robotertrajektorie in den vorgestellten Experimenten möglich war. Wie erwartet hat das verwendete Verfahren zur Bestimmung der Roboterposition aus einer sequentiellen relativen Orientierung von Bildtripeln deutliche Vorteile hinsichtlich der Anwendbarkeit innerhalb der Robotersteuerungsumgebung. Im Vergleich zur Bündelblockausgleichung weist dieses Verfahren allerdings besonders bei wiederholten Drehungen des Roboters senkrecht zur Blickrichtung (Experiment 3) deutliche Nachteile auf. Bei in Fahrtrichtung ausgerichteter Kamera (Experiment 1 und 2) kann erwartet werden, dass Drifteffekte in den Odometriedaten mit Hilfe dieses Verfahrens ausgeglichen werden können.

In den durchgeführten Experimenten konnte nachgewiesen werden, dass die Bündelblockausgleichung ein sehr genaues bildbasierendes Verfahren zur Roboterpositionierung ist. Damit ist dieses Verfahren für die Korrektur der Roboterposition und -ausrichtung geeignet und stellt so eine Alternative zu laserbasierten Positionierungsverfahren dar. Im folgenden ist, unter Einbindung von Merkmalsextraktion zur Herstellung der Punktkorrespondenzen, die Echtzeitfähigkeit des Verfahrens zu testen.

Für die weitere Arbeit ist eine Integration von Entfernung- und Richtungsmessungen in beide Verfahren vorgesehen. Damit sollen einerseits Fehlerfortpflanzungseffekte des sequentiellen Verfahrens eingedämpft werden. Andererseits versprechen wir uns davon eine Verbesserung der absoluten Positionierung, die genauere Bestimmung des Maßstabsfaktors der Robotertrajektorie und eine Erweiterung des berechneten 3D Modells der Roboterumgebung. Schließlich ist eine Strategie zur vollständigen Integration beider Verfahren in die Robotersteuerungsumgebung zu entwickeln.

8 Literaturverzeichnis

- ARRAS & SIEGWART (1997): K. O. Arras und R. Y. Siegwart. Feature extraction and scene interpretation for map-based navigation and map building. In *Proc. of Mobile Robotics XII (SPIE)*, 1997.
- BETKE & GURVITS (1997): M. Betke und L. Gurvits. Mobile Robot Localisation using Landmarks. *IEEE Trans. on Robotics and Automation* **13** (2), 1997.
- CHIUSO ET AL. (2002): A. Chiuso, P. Favaro, H. Jin und S. Soatto. Structure from motion causally integrated over time. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **24** (4), 2002.
- FICHTNER & GROSSMANN (2003): M. Fichtner und A. Großmann. A visual-sensor model for mobile robot localisation. In *Proc. of the 18th Int. Joint Conf. in Artif. Intelligence (IJCAI-03)*, 2003.
- FISCHLER & BOLLES (1987): M. A. Fischler und R. C. Bolles. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. In *Readings in Computer Vision: Issues, Problems, Principles, and Paradigms*. Morgan Kaufmann, 1987.
- GRUEN & KERSTEN (1995): A. Gruen und Th. Kersten. Sequential Estimation in Robot Vision. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **61** (1), 75–82, Januar 1995.
- HARTLEY & ZISSERMAN (2000): R. Hartley und A. Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, 2000.
- HORN (1990): B. K. P. Horn. Recovering baseline and orientation from essential matrix. Verfügbar über <http://www.ai.mit.edu/people/bkph/publications.html>, 1990.
- KAGER (1989): H. Kager. ORIENT: A universal photogrammetric adjustment system. In *Optical 3-D Measurement Techniques*, Seite 447–455. Wichmann Verlag, 1989.
- KONOLIGE (2001): K. Konolige. Robot motion: Probabilistic model; sampling and Gaussian implementations; Markov localisation. SRI course notes, 2001.
- MCLAUHLAN (2003): P. McLauchlan. The Gandalf vision and numerical library. Verfügbar über <http://gandalf-library.sourceforge.net/>, 2003.
- MONTEMERLO ET AL. (2002): M. Montemerlo, S. Thrun, D. Koller und B. Wegbreit. FastSLAM: A factored solution to the simultaneous localisation and mapping problem. In *Proc. of the 18th National Conf. on Artificial Intelligence (AAAI-02)*, 2002.
- THRUN ET AL. (2000): S. Thrun, D. Fox, W. Burgard und F. Dellaert. Robust Monte Carlo localisation for mobile robots. *Artificial Intelligence* **128** (1-2), 99–141, 2000.
- WOLF ET AL. (2002): J. Wolf, W. Burgard und H. Burkhardt. Robust vision-based localisation for mobile robots using an image retrieval system based on invariant features. In *Proc. of the Int. Conf. on Image and Video Retrieval (CIVR-02)*, 2002.

Echtzeitfähiger Multipositionssensor

R. W. Kuhn, B. Michaelis, R. Calow, J. Kaszubiak, M. Tornow*

Bei stereophotogrammetrischen Verfahren, welche das Korrespondenzproblem mit Hilfe der Flächenkorrelation lösen, ist der rechnerische Aufwand verhältnismäßig groß. Bei dem vorgestellten Verfahren wird der Aufwand für die Flächenkorrelation durch eine hierarchische Methode verringert, wobei auch bei großen Tiefenvariationen (wie z.B. bei einer Verkehrsanalyse) ein weitgehend konstanter relativer Fehler erzielt werden kann. Dies wird durch eine entfernungsabhängige Anpassung der Bildauflösung erreicht. Das Verfahren ist gut für eine Hardwareimplementierung geeignet. Es ist echtzeitfähig und läßt sich für bewegte Objekte, die automatisch segmentiert werden, anwenden.

1 Einleitung

Die Korrespondenzsuche auf der Basis der Flächenkorrelation ist in der Stereophotogrammetrie weit verbreitet (ASCHWANDEN 1993, ALBRECHT & MICHAELIS 1998). Werden die Flächenkorrelationsalgorithmen dabei auf eine sehr große Tiefenvariation angewendet und ist damit die Varianz der Disparität sehr groß, wird der Rechenaufwand bei der Korrespondenzsuche sehr hoch. Typische Anwendungsbereiche sind z.B. Fahrerassistenzsysteme. Die Feinstruktur der Objekte ist dabei ohne Bedeutung, es genügt ein mittlerer Abstandswert für jedes Objekt. Weiterhin liegt die betrachtete Fläche aller interessierenden Objekte in derselben Größenordnung, wenn die Entfernungsabhängigkeit herausgerechnet wird.

Um dem Fahrer ein Maximum an Reaktionszeit zur Verfügung zu stellen, muss die Verarbeitung so schnell wie möglich und kontinuierlich in Echtzeit durchführbar sein. Im folgenden wird ein Verfahren beschrieben, das den Rechenaufwand bei der Auswertung durch eine hierarchische Anpassung der Auflösung an die Entfernung der Messobjekte wesentlich reduziert.

1.1 Prinzip

In unseren Anwendungsfall (Fahrerassistenzsystem) erfolgt die Bildaufnahme mittels zweier im Normalfall der Stereophotogrammetrie justierten Kameras. Um eine Messung bei bewegten Objekten durchführen zu können, müssen die beiden Bilder des Bildpaares zeitgleich aufgenommen werden. Unter Vernachlässigung bzw. Korrektur der Verzeichnung der Kameras wird im Stereonormalfall das Korrespondenzproblem des zweidimensionalen Vergleichs auf ein eindimensionales (Epipolarlinie entspricht Pixelzeile) reduziert. Damit wird die Rechenzeit erheblich vermindert. Erwähnt sei, das auch durch eine rechnerische Korrektur der Kameraanordnung der Normalfall durch eine Rektifizierung der Bilder hergestellt werden kann. Des Weiteren kann man die vertikale Bildauflösung (und damit auch die Rechenzeit) bei geeigneten Objekten (vorwiegend horizontale Kanten) durch Mittelung mehrere Zeilen reduzieren. Dieses führt gleichzeitig zu einer Glättung der Bilder.

Ein Maß für die Entfernung ist dann die horizontale Verschiebung (Disparität Δu) korrespondierender Bereiche in den Bildern gegeneinander. Es ergeben sich die folgenden bekannten Gleichungen zur Berechnung der Entfernung Z , der horizontalen X - und der vertikalen Y -Position:

$$Z = \frac{c \cdot B}{\Delta u}; \quad X = x \cdot \frac{B}{\Delta u}; \quad Y = y \cdot \frac{B}{\Delta u} \quad (1)$$

*O.-v.-Guericke-Universität Magdeburg, IESK, Postfach 4120, 39016 Magdeburg
Email: rkuhn@ipe.et.uni-magdeburg.de

Hier sind c die Kammerkonstante, B die Basisbreite, x die horizontale und y die vertikale Bildkoordinate.

1.2 Ähnlichkeitskriterium

Zum Vergleich der beiden Bilder und zum Finden der Korrespondenzen wird ein Ähnlichkeitskriterium Q verwendet. Dabei basiert das Verfahren der Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate (least squares matching, LSM) auf einer geometrischen und gegebenenfalls radiometrischen Transformation zwischen Musterbild und Suchbild mit dem Ziel, die Quadratsumme der Grauwertdifferenzen zwischen dem Musterbild und dem transformierten Suchbild zu minimieren. Aus diesen Überlegungen lassen sich verschiedene Kriterien wie das von Moravec oder die Kreuzkorrelationsfunktion (KKF) herleiten. Bei Verwendung dieser Ähnlichkeitskriterien können Probleme durch das Auftreten von additiven (z.B. Offset zwischen den Kennlinien der Kameras) und multiplikativen (z.B. Beleuchtungsschwankungen oder Änderung der Blendenöffnung) Bildstörungen entstehen. Eine Lösung dafür bietet die normierte mittelwertfreie KKF (Gl. 2, KKFMF, vgl. ASCHWANDEN 1993):

$$Q(x, y) = \frac{\sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^m \overline{F(i, j)} \cdot \overline{P(x+i, y+j)}}{\sqrt{\sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^m \overline{F(i, j)}^2 \cdot \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^m \overline{P(x+i, y+j)}^2}} \quad (2)$$

Dabei sind $\overline{F(x, y)}$ der mittelwertfreie Pixel des Suchblockes, $\overline{P(i, j)}$ der mittelwertfreie Pixel des Referenzblockes. m sowie n beschreiben die Größe des Fensters. Während die Lage der Extrema bereits bei der KKF nahezu invariant gegenüber multiplikativen Helligkeitsänderungen ist, werden bei der KKFMF auch die additiven Störungen durch die mittelwertfreie Betrachtung weitgehend ausgeschlossen. Durch die Normierung ergeben sich Werte zwischen -1 und $+1$. Ein Maximum dieser Funktion signalisiert die größte Ähnlichkeit. Gleichzeitig kann durch den festen Wertebereich eine Rückweisungsschwelle angesetzt werden, unter der alle Korrelationsergebnisse zurückgewiesen werden. Dabei wurde in unseren Versuchen mit Werten zwischen 0.75 und 0.9 gearbeitet. Die Berechnung des Ähnlichkeitskriteriums kann ereignisgesteuert (Auftreten von Kanten) erfolgen oder es wird durch eine volle Suche realisiert. Wegen der vorgesehenen Hardwareimplementierung wurde der zweite Weg beschritten, wobei aber das Ergebnis der Korrelation nur bei Auftreten von geeigneten Merkmalen ausgewertet wird (siehe Abschnitt 2.2).

2 Reduzierung des Aufwandes mittels eines hierarchischen Ansatzes

2.1 Prinzip und Hintergrund

Im hier vorliegenden Anwendungsbeispiel geht der Messbereich in Z -Richtung je nach Sichtverhältnissen von 10 bis ca. 100m . Bei großen Entfernungen sind die Objekte sehr klein (wenige Pixel) und auch die Disparität nimmt nur geringe Werte an. Im Gegensatz dazu sind nahe Objekte relativ groß, ebenso ihre Disparität. Die hohe Auflösung naher Objekte ist meist nicht erforderlich und kann sogar störend wirken. Eine Anpassung an Objekte in verschiedenen Entfernungen bzw. Positionen durch den Aufbau einer Bildpyramide unterschiedlicher Auflösung und schrittweiser Umschaltung ist ein üblicher Weg. Hier ergibt sich jedoch der Sonderfall, dass die realen Abmessungen aller interessierenden Objekte nicht sehr stark voneinander abweichen und in derselben Größenordnung liegen. Die Größe der Stirnfläche hängt eindeutig mit der Entfernung zusammen. Deshalb kann auf eine Adaption der Auflösung verzichtet werden und bei der Einführung von Hierarchieebenen von vornherein eine Zuordnung zum Meßbereich vorgenommen werden.

Beim hierarchischen Ansatz repräsentiert jede Ebene einen bestimmten Tiefenbereich. Die Verteilung der verschiedenen Tiefenbereiche auf die einzelnen Ebenen hängt vom stereophotogrammetrischen System ab. Die Aufteilung der Messbereiche für ein Beispielsystem mit zwei Kameras vom Typ JAI CV-M4 und einer Basisbreite von einem Meter ist in folgender Tabelle dargestellt:

Ebene	Auflösung in Originalaufl.	Suchbereich Orig.-aufl. [Pix]	Messbereich [m]
0	1/1	16	„∞“ - 112
1	1/2	32	112-56
2	1/4	64	56-28
3	1/8	128	28-14

Die Bedeutung von „∞“ hängt von der Aufgabenstellung ab. Ein Objekt muss wenigstens einige Pixel breit erscheinen. Eine Fortführung des Ansatzes oberhalb der 4. Ebene ist für das betreffende Aufnahmesystem nicht sinnvoll, da die Blockgröße der Korrelationsfunktion in diesem Fall bereits so groß wie der Suchbereich ist. Die gewählte Anordnung ermöglicht die Berechnung einer wesentlich geringeren Zahl an Korrelationswerten bei der Suche. Nachstehend wird erläutert, wie eine weitgehende Formalisierung durch Einführung hierarchischer Ebenen möglich ist und auch Hardwareimplementierungen wesentlich erleichtert werden.

2.2 Generierung und Auswertung der hierarchischen Ebenen

Es werden Ebenen mit zugeordneten Tiefenbereichen verschiedener Auflösung eingeführt. Die Erzeugung der einzelnen Ebenen erfolgt durch die Verringerung der Auflösung der Zeilen um einen festen Faktor für jede weitere Ebene.

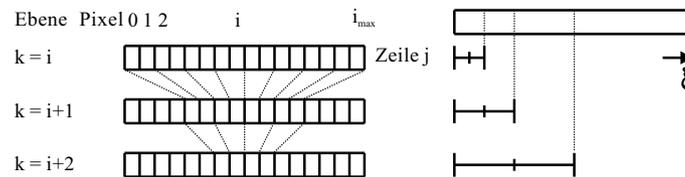


Abbildung 1: Aufbau der Bildpyramide (zeilenorientiert) und abgedeckter Disparitätsbereich ξ

In Abb. 1 ist ein Beispiel für den Faktor $1/2$ dargestellt. Die Generierung der einzelnen Ebenen geschieht nun durch Ersetzen mehrerer benachbarter Pixel durch einen, in Abb. 1 zum Beispiel im Verhältnis 2:1. Die Auflösungsreduzierung kann durch eine gewichtete Funktion, aber auch durch Mittelwertbildung benachbarter Pixel erfolgen (Normalfall). Bei Versuchen zeigte sich, dass die Mittelwertbildung bereits ausreichend ist und auch das Abtasttheorem berücksichtigt (integrale Abtastung). Die einzelnen Ebenen lassen sich jeweils mit dem gleichen Algorithmus aus der jeweils vorhergehenden berechnen. Wie oben beschrieben werden zur Bestimmung der Disparität dann die Zeilen der Bilder in den verschiedenen Auflösungen miteinander korreliert. Der Algorithmus bleibt auf Pixelebene unverändert. Dabei ist in allen Ebenen die Suchweite gleich, die maximal bestimmbare Disparität bezogen auf die Originalauflösung nimmt aber um den Faktor der Auflösungsreduzierung zu. Auch das Suchfenster ändert sich in der Originalauflösung entsprechend.

Es wird nun in allen Ebenen die Korrelation durchgeführt. Für jeden Referenzblock erhält man für eine maximale Suchdisparität je Ebene von z.B. 16 entsprechend 16 Korrelationsergebnisse für jede Ebene. In dem sich ergebenden Suchbereich werden nun die Lagen der Maxima oberhalb eines vorgegebenen Schwellwertes ermittelt. Dabei werden nur die Maxima ausgewertet, die weitgehend mit Objektmerkmalen (Objektkanten) korrespondieren. Dadurch wird die Tiefenkarte von vornherein ausgedünnt und auf interessierende Objekte konzentriert. Zur Kantendetektion wurde der Aufgabenstellung angepaßt ein Verfahren entwickelt, das die ohnehin implementierte Berechnung von Gl. 2 nutzt. Zur Überprüfung, ob im Referenzblock eine Objektkante vorliegt, wird der Nenner verwendet. Liegt dieser unterhalb einer Schwelle, so wird auf eine fehlende Kante geschlossen und für diesen Block die Disparität auf 0 und der Korrelationswert auf -1 gesetzt und die Berechnung abgebrochen.

Disparitätswerte aus Ebenen mit reduzierter Auflösung müssen dann auf die Originalauflösung entsprechend zurückgerechnet werden. Für die anschließende Auswertung wird dann die subpixelgenaue Disparität z.B. mittels quadratischer Interpolation des Maximums von $Q(x, y)$ und die 3D-Koordinaten z.B. unter Verwendung der Gleichung 1 berechnet. Daraus ergibt sich eine Tiefenkarte (vgl. Abb. 4(b)), die ausgewertet werden kann.

2.3 Kalibrierung und Fehlerbetrachtung

Bei der Auswertung werden in den Ebenen mit geringer Auflösungen die nahen Objekte erfaßt. Mit der Originalauflösung der Kamera werden die Objekte in maximaler Messentfernung analysiert. Dadurch, dass die nahen Objekte mit geringerer Auflösung vermessen werden, wird der absolute Fehler für diese bezüglich der Berechnung der 3D-Koordinaten natürlich erhöht. Zu den verfahrensbedingten Fehlerverlauf kommen die weiteren Fehler der Messeinrichtung (Optik, Kalibrierung, aber auch Schwingungseinflüsse im Fahrzeug usw.) hinzu. Besondere Beachtung benötigen dabei die systematischen Fehler. Laut ALBERTZ & KREILING 1989 sind die Auswirkungen von Fehlern in der Bestimmung der Kammerkonstanten und des Hauptpunktes sowie Kantungs-, Neigungs- und Schwenkungsfehler auf die Bildkoordinaten unabhängig von der Entfernung des Meßobjektes. Man erhält mittels Fehlerfortpflanzungsgesetz für die Standardabweichung von Z :

$$\sigma_z = \frac{c}{du} \cdot \sigma_B + \frac{B}{du} \cdot \sigma_c - \frac{c \cdot B}{du^2} \cdot \sigma_{du} = \frac{Z}{B} \cdot \sigma_B + \frac{Z}{c} \cdot \sigma_c - \frac{Z^2}{c \cdot B} \cdot \sigma_{du} \quad (3)$$

Systematische Fehler werden als konstant angenommen. Man erhält nach Zusammenfassung von Gl. 3 für die Verbesserung ΔZ eines Meßwertes Z folgenden Zusammenhang:

$$\Delta Z = \frac{Z \cdot c \cdot \sigma_B + Z \cdot B \cdot \sigma_c}{c \cdot B} - \frac{Z^2}{c \cdot B} \cdot \sigma_{du} \quad (4)$$

Es ergibt sich so nun nach Einführung einer additiven Konstante ein verbessertes Z (\bar{Z}) zu

$$\bar{Z} = \frac{k}{du^2} + \frac{l}{du} + m \quad \text{mit} \quad k, l, m \in \mathbb{R} \quad (5)$$

Eine separate Ermittlung von Basisbreite und Kammerkonstante ist nicht mehr notwendig. Die Koeffizienten k, l, m sind in einer Kalibrierung zu ermitteln. Ein ähnlicher Zusammenhang ergibt sich auch für die Bestimmung von X . Hier ergibt sich für die Verbesserung $\Delta X = n \cdot Z + o \cdot X + p$ mit $n, o, p \in \mathbb{R}$. Es ist zu beachten, dass die Auswirkungen der systematischen Fehler auf die Bildkoordinaten nicht unabhängig von der X -Position des Objektes ist. Versuche zeigten aber, dass die Genauigkeit für die angestrebte Anwendung ausreichend ist.

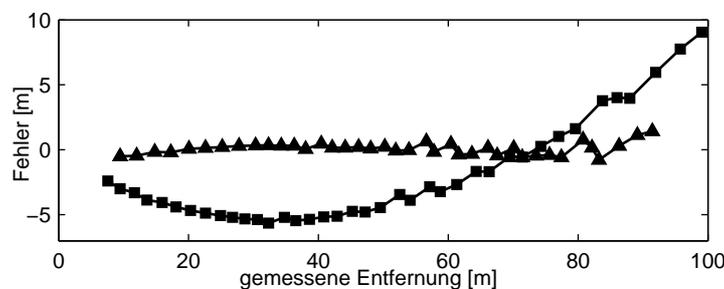


Abbildung 2: Fehler in der Entfernungsbestimmung vor (■) und nach (▲) der Korrektur der systematischen Fehler.

3 Hardwareimplementierung des hierarchischen Algorithmus

Das beschriebene Verfahren ist für eine Hardwareimplementierung mit hoher Verarbeitungsgeschwindigkeit geeignet. Aufgrund einer sprunghaften Verarbeitung und eines konstanten Datenflusses können konstante Verarbeitungszeiten erreicht werden. Die für die Implementierung verwendete Plattform ist das FPGA EPXA10 der Firma Altera (siehe auch KASZUBIAK U.A. 2004). Diese Hardwareplattform enthält eine frei programmierbare Logik und einen Mikroprozessor. Somit kann der Algorithmus mittels eines Hardware-Software-Co-Designs auf einem Chip realisiert werden.

Durch die Unterteilung des Algorithmus in Vorverarbeitung und Auswertung (Abschnitt 2.2) ist es möglich, die Korrespondenzsuche mit einem einzigen Hardware-Korrelator durchzuführen. In diesem kann die gewählte Gütefunktion implementiert werden. Da eine Implementierung der Wurzel sich nur ungünstig

realisieren läßt, wurde im betrachteten Fall die quadrierte normierte KKFMMF in einem voll parallelen und synchronen Design in die Hardware implementiert. Durch diese Struktur kann die Berechnung synchron zur Bildaufnahme erfolgen. Es ergibt sich nur ein geringer zeitlicher Versatz der Ergebnisse zu den Originalbildern (1 Zeile). Im Prozessor erfolgen dann komplexere Verarbeitungsschritte wie die Clustering und der Kalmanfilter zur Weiterverfolgung.

4 Meßergebnisse

Die Leistungsfähigkeit des Verfahrens wurde sowohl im Labor als auch in realen Straßenszenen untersucht. Die Genauigkeit für die Z-Richtung ist in Abb. 3 dargestellt. Der mittlere relative Fehler für die Labormessungen (links in in Abb. 3) beträgt ca. 0,3%. Für die Straßennmessungen (mittig in Abb. 3) liegt der relative Fehler im Bereich von 1%, bei der Autobahnmessung leicht darüber. Eine Tiefenkarte der Autobahnmessung ist in Abb. 4(b) dargestellt.

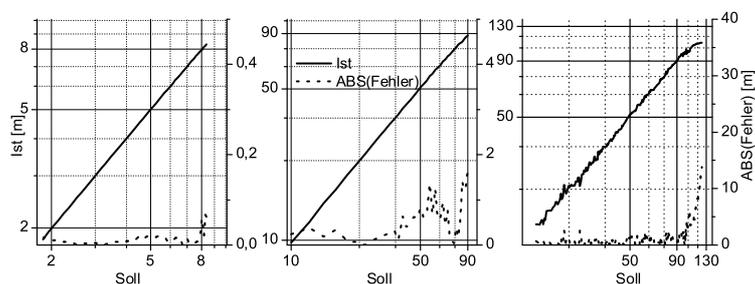


Abbildung 3: Messergebnisse. Links (Labor). Mittig (Straße) statisches, rechts (Autobahn) bewegtes Meßobjekt.

5 Clustering

Für einzelne Objekte erhält man in der Regel mehrere Positionswerte. Diese werden durch geeignete Clusterbildung zusammengefasst. Für die Fehlerbetrachtung (insbesondere bei Straßenszenen) werden demzufolge meist die Clusterzentren zugrunde gelegt. Ziel der Clustering ist es nun, in der Tiefenkarte Autos zu detektieren und die erkannten Autos über der Zeit zu verfolgen. Die Grundidee besteht darin, dass ein Auto in der Tiefenkarte eine Häufung einer bestimmten (mit seiner Entfernung korrelierenden) Disparität bewirkt. Ermittelt man in der Tiefenkarte entlang einer Bildspalte für jede Disparität, wie häufig sie in der Zeile auftritt, so erhält man ein Disparitätshistogramm ähnlich eines Bildes, in welchem u.a. Fahrzeuge mit lokalen Maximas auftreten.

Um diese dann zu verfolgen, ist es notwendig, die einzelnen Histogramme über die Zeit zu analysieren. Dazu wird eine zweite Map (Zeithistogramm) mit der Größe und Struktur des Disparitätshistogrammes aufgebaut. In dieser wird der Wert an der Stelle der Disparität in der entsprechenden Spalte um eins erhöht, sollte der Wert im Disparitätshistogramm über einer bestimmten Schwellwert liegen (Fahrzeughöhe). Befindet er sich darunter, so wird der Wert nach jeder Bildaufnahme entsprechend verringert. Alle Pixel im Zeithistogramm mit einem Wert, der über einer bestimmten Schwelle liegt, werden als Teil eines Clusters angenommen. Als letzten Schritt ist ein Labeling (also eine Zusammenfassung der entsprechenden Pixel zu den einzelnen Autos) notwendig. Ein Ergebnis sieht man in Abb. 4(c).



Abbildung 4: Ein Bild aus einer Sequenz, die Tiefenkarte sowie die erkannten Cluster.

6 Schlußfolgerungen

Das vorgestellte Verfahren ist für Anwendungen mit mittleren Genauigkeitsanforderungen ($< 1\%$) gut geeignet, wenn große Abstandsvariationen zu erfassen sind und harte Echtzeitforderungen bestehen. Messungen bestätigen die geforderten Eigenschaften. Neben einer reinen Softwareimplementation zeigt das Hardware-Software Co-Design die gute Eignung für entsprechende Lösungen im Echtzeitbereich.

Dieses Projekt wurde gefördert durch das BMBF FKZ 03i1210a sowie BMBF/LSA FKZ 0028IF0000 und FKZ 0046KE0000.

Literatur

- [Albertz und Kreiling 1989] ALBERTZ, J. ; KREILING, W.: *Photogrammetrisches Taschenbuch*. vierte Auflage. Karlsruhe: Herbert Wichmann Verlag GmbH, 1989
- [Albrecht und Michaelis 1998] ALBRECHT, P. ; MICHAELIS, B.: Improvement of Spatial Resolution of an Optical 3-D Measurement Procedure. In: *IEEE Instrumentation and Measurement vol. 47*, 1998, S. 158–162
- [Aschwanden 1993] ASCHWANDEN, Peter F.: *Experimenteller Vergleich von Korrelationskriterien in der Bildanalyse*, ETH Zürich, Dissertation, 1993
- [Kaszubiak u. a. 2004] KASZUBIAK, J. ; TORNOW, M. ; KUHN, R. W. ; MICHAELIS, B.: Real-time, 3-D-multi object position estimation and tracking. In: *ICPR 2004 (Paper accepted)*, 2004, S. –
- [Tornow u. a. 2003] TORNOW, M. ; MICHAELIS, B. ; KUHN, R. W. ; CALOW, R. ; MECKE, R.: Hierarchical Method for Stereophotogrammetric Multi-object-Position Measurement. In: *Pattern Recognition*, 2003, S. 164–171

Autorenverzeichnis

ALBERTZ, J., GEHRKE, S., LEHMANN, H., SCHUMACHER, T. & NEUKUM, G.: Die ersten Blätter des neuen Kartenwerks "Topographic Image Map Mars 1:200 000"	555
ASCHOFF, T., THIES, M., WINTERHALDER, D., KRETSCHMER, U. & SPIECKER, H.: Automatisierte Ableitung von forstlichen Inventurparametern aus terrestrischen Laserscannerdaten	341
ATTWENGER, M.: siehe KRAUS, K., ATTWENGER, M., BRIESE, C. & MANDEL- BURGER, G.: Qualitätsmaße für digitale Geländemodelle am Beispiel eines Photogrammetrie- und eines Laserscannerprojektes	175
BANZHAF, E.: Detektion von potenziellen Industriebrachen mittels Ferner- kundungs- und GIS Daten. Das Beispiel Baltimore City, Maryland, USA	271
BAUERHANSL, CH., WÜRLÄNDER, R. & RIEGER, W.: Verbesserte Ableitung von Geländemodellen aus der digitalen Bildzuordnung	41
BEISL, U.: Radiometrische Verarbeitung der ADS40 Bilddaten	505
BIND, J.: Makhtesh Ramon, Israel – Beispiel einer geologischen Auswer- tung hyperspektraler Fernerkundungsdaten in ariden Gebieten	459
BODENMÜLLER, T.: siehe GRIESBACH, D., BÖRNER, A., SCHEELE, M., SCHEIBE, K., SUJEW, S., BODENMÜLLER, T. & SUPPA, M.: Kombiniertes Einsatz von Zeilenkamera und inertialem Messsystem	539
BOHMANN, G.: siehe GÄHLER, M., SCHIEWE, J., BOHMANN, G. & JANOWSKY, R.: Kombination von Laserscanningdaten und höchstauflösenden multi spektralen Bilddaten zur Biotoptypenklassifizierung	87
BÖRNER, A., HETZHEIM, H., KIEMLE, C., LAPORTE, L. & WIRTH, M.: Simula- tionsansätze für das Wasserdampf-Differential-Absorptions-Lidar- system WALES	495
BÖRNER, A.: siehe GRIESBACH, D., BÖRNER, A., SCHEELE, M., SCHEIBE, K., SUJEW, S., BODENMÜLLER, T. & SUPPA, M.: Kombiniertes Einsatz von Zeilenkamera und inertialem Messsystem	539
BRIESE, C.: siehe KRAUS, K., ATTWENGER, M., BRIESE, C. & MANDEL- BURGER, G.: Qualitätsmaße für digitale Geländemodelle am Beispiel eines Photogrammetrie- und eines Laserscannerprojektes	175
BRZANK, A. & LOHMANN, P.: Steigerung der Genauigkeit von Digitalen Geländemodellen im Küstenbereich aus Laserscannermessungen ..	203
BUCERIUS, M. & FUß, R.: Fernerkundung auf Schutz- und Förderflächen – Landnutzung von ausgewählten Moorschutzgebieten in Nordbayern ..	295
BUTENUTH, M.: Extraction of Field Boundaries and Wind Erosion Obstacles from Aerial Imagery	77
BUTHENUTH, M.: siehe GÖSSELN V. G., BUTHENUTH, M. & TIEDGE, M.: Inte- gration von Daten unterschiedlicher Herkunft	151
CALOW, R.: siehe KUHN, R.W., MICHAELIS, B., CALOW, R., KASZUBIAK, M. & TORNOW, M.: Echtzeitfähiger Multipositionierungssensor	601
CZEGKA, W.: Die Qualität der SRTM-90m Höhendaten im Hinblick auf Anwendungsmöglichkeiten in den Geo- und Umweltwissenschaften ..	211
DERPMANN-HAGENSTRÖM, P.: siehe RAGUSE, K., DERPMANN-HAGEN- STRÖM, P. & KÖLLER, P.: Verifizierung von Simulationsmodellen für Fahrzeugsicherheitsversuche	367

DOLP, S.: siehe MEISSNER, B., RICHTER, M. & DOLP, S.: FE-basiertes Wurzelschwamm-Monitoring in der Wiederaufforstung der Lausitzer Tagebau-Folgelandschaft	195
DÖRSTEL, C., REULKE, R. & SCHWEBEL, R.: Berücksichtigung digitaler Kameras im neuen Normentwurf E DIN 18740-4	235
DRESCHER, A.K.: Geometrische Grenzen für den Einsatz der Time Delay and Integration Methode (TDI) in Zeilenkameras für Fernerkundung	565
EBNER, H.: siehe HEIPKE, C., SCHMIDT, R., EBNER, H., SPIEGEL, M. & NEUKUM, G.: Bestimmung der äußeren Orientierung des Mars Express Orbiters	529
ELMHORST, A.: siehe WIGGENHAGEN, M., ELMHORST, A. & WISSMANN, U.: Digitale Nahbereichsphotogrammetrie zur Objektrekonstruktion der Bremer Hanse Kogge	383
FISCHER, C.: siehe FRANZKE, H.J., FISCHER, C., MÜLLER, R. & WETZEL, H.-U.: Das Strukturmuster des Harzes, ermittelt aus Satellitendaten und digitalen Geländemodellen	391
FISLER, A.: siehe JANSSEN-WEETS, S., FISLER, A., JANTOS, R. & WEISENSEE, M.: Fernerkundung im Labor – Ein Outdoor-Handspektrometer in der Laboranalytik	573
FRANZKE, H.J., FISCHER, C., MÜLLER, R. & WETZEL, H.-U.: Das Strukturmuster des Harzes, ermittelt aus Satellitendaten und digitalen Geländemodellen	391
FUß, R.: siehe BUCERIUS, M. & FUß, R.: Fernerkundung auf Schutz- und Förderflächen – Landnutzung von ausgewählten Moorschutzgebieten in Nordbayern	295
GÄHLER, M., SCHIEWE, J., BOHMANN, G. & JANOWSKY, R.: Kombination von Laserscanningdaten und höchstauflösenden multispektralen Bilddaten zur Biotoptypenklassifizierung	87
GEHRKE, S.: siehe ALBERTZ, J., GEHRKE, S., LEHMANN, H., SCHUMACHER, T. & NEUKUM, G.: Die ersten Blätter des neuen Kartenwerks "Topographic Image Map Mars 1:200 000"	555
GERIGHAUSEN, H. & MÖLLER, M.: Detektion von Schlaggrenzen und der Bodenbearbeitungsrichtung ackerbaulich genutzter Flächen aus höchstauflösenden Fernerkundungsdaten (Quickbird)	303
GERKE, M.: Quality Assessment of Road Databases Using Aerial Imagery .	95
GIELSDORF, F.: siehe RIETDORF, A. & GIELSDORF, F.: Kalibrierung von Laserscannern	375
GIESE, B.: siehe SCHOLTEN, F., GWINNER, K., GIESE, B., OBERST, J., ROATSCH, T., JAUMANN, R., NEUKUM, G. & DAS HRSC-TEAM: HRSC auf Mars Express – Photogrammetrische Datenverarbeitung im planetaren Umfeld	467
GLOTZBACH, C. & PRINZ, T.: Bewertung von Landsat-ETM+- und ASTER-Daten im Hinblick auf ihre geologische Aussagekraft am Beispiel des intrakratonen Amadeus Basins, Finke Gorge National Park (Australien)	397
GÖSSELN V. G., BUTHENUTH, M. & TIEDGE, M.: Integration von Daten unterschiedlicher Herkunft	151
GRENZDÖRFFER, G.: Möglichkeiten der Fernerkundung für den Aufbau eines Alleenkatasters	219

GRIESBACH, D., BÖRNER, A., SCHEELE, M., SCHEIBE, K., SUJEW, S., BODENMÜLLER, T. & SUPPA, M.: Kombinerter Einsatz von Zeilenkamera und inertialem Messsystem	539
GROHMANN, D.: siehe ZIEMANN, H. & GROHMANN, D.: Stand des EuroSDR-Projektes Digitale Kameras	491
GUDMUNDSSON, Á.: siehe MÜNZER, U., SCHARRER, K., WEBER-DIEFEN- BACH, K. & GUDMUNDSSON, Á.: Integration von ENVISAT_ASAR Daten in ein GIS-System zum Katastrophen-Monitoring im Rahmen des ENVISAT-Projektes [ID 142]	417
GWINNER, K.: siehe SCHOLTEN, F., GWINNER, K., GIESE, B., OBERST, J., ROATSCH, T., JAUMANN, R., NEUKUM, G. & DAS HRSC-TEAM: HRSC auf Mars Express – Photogrammetrische Datenverarbeitung im planetaren Umfeld	467
HAMPEL, U.: siehe SCHULZE, M. & HAMPEL, U.: Erfassung und Analyse von Prüfkörpern in der Materialprüfung durch Computertomographie	317
HANNUSCH, D.: siehe MULSOW, C. & HANNUSCH, D.: Untersuchungen zu einem flugzeugbasierten Digitalkamera-System mit direkter Sensororientierung	547
HASTEDT, H., LUHMANN, T. & TECKLENBURG, W.: Bestimmung von Einflussgrößen in der Nahbereichsphotogrammetrie mittels Monte-Carlo-Simulation	359
HEIPKE, C., SCHMIDT, R., EBNER, H., SPIEGEL, M. & NEUKUM, G.: Bestimmung der äußeren Orientierung des Mars Express Orbiters ..	529
HELLER, J.: siehe PAKZAD, K & HALLER, J.: Automatic Scale Adaptation of Semantic Nets	67
HETZHEIM, H.: siehe BÖRNER, A., HETZHEIM, H., KIEMLE, C., LAPORTE, L. & WIRTH, M.: Simulationsansätze für das Wasserdampf-Differential-Absorptions-Lidarsystem WALES	495
HOFFMANN, H.: siehe MEISSNER, B., WYSS, D., ZAKRZEWSKI, M., TEUSAN, S. & HOFFMANN, H.: GIS gestützte Methoden zur Erfassung von Waldressourcen in der Mongolei im Rahmen der Entwicklungszusammenarbeit	187
HOFMANN, A.D. & SCHWALBE, E.: Evaluation automatisch rekonstruierter Gebäudemodelle aus Flugzeugscannerdaten	51
HÖNNINGER, C.: siehe KERSTEN, T.P., MECHELKE, K. & HÖNNINGER, C.: Topo- graphische Geländeaufnahme mit terrestrischem 3D-Laserscanner .	333
HYUN-OK KIM: siehe KLEINSCHMIT, B. & HYUN-OK KIM: Anwendung sehr hochauflösender Satellitenbilddaten zur urbanen Biotp- und Nutzungstypenkartierung – dargestellt am Beispiel der südkoreanischen Megastadt Seoul	263
JACOBSEN, K.: Generierung und Validierung von Höhenmodellen aus Weltrauminformationen	475
JACOBSEN, K.: siehe LOHMANN, P., JACOBSEN, K., PAKZAD, K. & KOCH, A.: Vergleichende Informationsextraktion aus SAR- und optischen Bildern	581
JAHN, H.: siehe SCHEELE, M., JAHN, H. & SCHUSTER, R.: Geometrische Kalibration von CCD Kameras mittels Beugungsbildern	513
JANOWSKY, R.: siehe GÄHLER, M., SCHIEWE, J., BOHMANN, G. & JANOWSKY, R.: Kombination von Laserscanningdaten und höchstauflösenden multispektralen Bilddaten zur Biotoptypen- klassifizierung	87

JANSSEN-WEETS, S., FISLER, A., JANTOS, R. & WEISENSEE, M.: Fernerkundung im Labor – Ein Outdoor-Handspektrometer in der Laboranalytik	573
JANTOS, R.: siehe JANSSEN-WEETS, S., FISLER, A., JANTOS, R. & WEISENSEE, M.: Fernerkundung im Labor – Ein Outdoor-Handspektrometer in der Laboranalytik	573
JAUMANN, R.: siehe SCHOLTEN, F., GWINNER, K., GIESE, B., OBERST, J., ROATSCH, T., JAUMANN, R., NEUKUM, G. & DAS HRSC-TEAM: HRSC auf Mars Express – Photogrammetrische Datenverarbeitung im planetaren Umfeld	467
KAROW, T. & PRINZ, T.: Erfassung strukturgeologischer Daten in ariden Gebieten auf der Basis von digitalen Höhenmodellen und hochauflösenden stereoskopischen Luftbildern am Beispiel des intrakratonen Amadeus Basins, Finke Gorge National Park (Australien)	407
KÄSER, M. & REULKE, R.: Laserscanner in der As-Built Dokumentation	129
KASZUBIAK, M.: siehe KUHN, R.W., MICHAELIS, B., CALOW, R., KASZUBIAK, M. & TORNOW, M.: Echtzeitfähiger Multipositionierungssensor	601
KATTERFELD, CH. & KREMEIKE, K.: eLearning in der Geoinformatik – Die Projekte ELAN und FerGI	27
KERSTEN, T.P., MECHELKE, K. & HÖNNIGER, C.: Topographische Geländeaufnahme mit terrestrischem 3D-Laserscanner	333
KIEMLE, C.: siehe BÖRNER, A., HETZHEIM, H., KIEMLE, C., LAPORTE, L. & WIRTH, M.: Simulationsansätze für das Wasserdampf-Differential-Absorptions-Lidarsystem WALES	495
KLEINSCHMIT, B. & HYUN-OK KIM: Anwendung sehr hochauflösender Satellitenbilddaten zur urbanen Biotp- und Nutzungstypenkartierung – dargestellt am Beispiel der südkoreanischen Megastadt Seoul	263
KNÖPPEL, A. & PIETZSCH, T.: Vergleich von Bündelblockausgleichung und sequentieller relativer Orientierung von Bildtripeln zur Roboterpositionierung	593
KOCH, A.: Semantisch korrekte Integration von Digitalem Gelände- und Landschaftsmodell – Verfahren und Ergebnisse	167
KOCH, A.: siehe LOHMANN, P., JACOBSEN, K., PAKZAD, K. & KOCH, A.: Vergleichende Informationsextraktion aus SAR- und optischen Bildern	581
KÖLLER, P.: siehe RAGUSE, K., DERPMANN-HAGENSTRÖM, P. & KÖLLER, P.: Verifizierung von Simulationsmodellen für Fahrzeugsicherheitsversuche	367
KOLLERSBERGER, T.: siehe OTT, N. & KOLLERSBERGER, T.: Satellitenbildoptimierung und Zielklassenkartierung alterierter Mineralisationen in den zentralen Anden Chiles	449
KÖNIG, G. & WESER, T.: Entwicklungen zu einem adaptiven Lernangebot	19
KRAUS, K., ATTWENGER, M., BRIESE, C. & MANDELBURGER, G.: Qualitätsmaße für digitale Geländemodelle am Beispiel eines Photogrammetrie- und eines Laserscannerprojektes	175
KREMEIKE, K.: siehe KATTERFELD, CH. & KREMEIKE, K.: eLearning in der Geoinformatik – Die Projekte ELAN und FerGI	27
KRESSE, W.: Committee Draft der ISO 19130 "Sensor and data	

models for imagery and gridded data"	251
KRETSCHMER, U.: siehe ASCHOFF, T., THIES, M., WINTERHALDER, D., KRETSCHMER, U. & SPIECKER, H.: Automatisierte Ableitung von forstlichen Inventurparametern aus terrestrischen Laserscannerdaten	341
KRÜGER, W.: siehe SAUR, G. & KRÜGER, W.: Automatische Feingeokodierung von SAR-Bildern mittels robuster Karte-zu-Bild- Registrierung	105
KUHN, R.W., MICHAELIS, B., CALOW, R., KASZUBIAK, M. & TORNOW, M.: Echtzeitfähiger Multipositionierungssensor	601
LAKES T.M.: Standardisierung von Geoinformationssystemen aus Sicht der städtischen Planung	243
LAPORTE, L.: siehe BÖRNER, A., HETZHEIM, H., KIEMLE, C., LAPORTE, L. & WIRTH, M.: Simulationsansätze für das Wasserdampf-Differential- Absorptions-Lidarsystem WALES	495
LEHMANN, H.: siehe ALBERTZ, J., GEHRKE, S., LEHMANN, H., SCHUMACHER, T. & NEUKUM, G.: Die ersten Blätter des neuen Kartenwerks "Topographic Image Map Mars 1:200 000"	555
LEHNER, M.: siehe SCHROEDER, M., REINARTZ, P., LEHNER, M. & MÜLLER, R.: Validation of stereo-data of the SPOT HRS camera system	483
LINDNER, W.: Digitale Photogrammetrie am PC – Neue Ansätze für die Ausbildung	35
LOHMANN, P., JACOBSEN, K., PAKZAD, K. & KOCH, A.: Vergleichende Informationsextraktion aus SAR- und optischen Bildern	581
LOHMANN, P.: siehe BRZANK, A. & LOHMANN, P.: Steigerung der Genauigkeit von Digitalen Geländemodellen im Küstenbereich aus Laserscannermessungen	203
LUHMANN, T.: siehe HASTEDT, H., LUHMANN, T. & TECKLENBURG, W.: Bestimmung von Einflussgrößen in der Nahbereichsphotogrammetrie mittels Monte-Carlo-Simulation	359
LUHMANN, T.: siehe WENDT, A., LUHMANN, T., RIEDE, R. & WEISENSEE, M.: Multiple Bildkorrelation im dreidimensionalen Objektraum mit konvergenten Aufnahmen	59
MAAS, H.-G.: siehe SCHWALBE, E., MAAS, H.-G., WAGNER, S. & ROSCHER, M.: Akquisition und Auswertung digitaler Hemisphärenbilder für waldökologische Untersuchungen	113
MANDELBURGER, G.: siehe KRAUS, K., ATTWENGER, M., BRIESE, C. & MANDELBURGER, G.: Qualitätsmaße für digitale Geländemodelle am Beispiel eines Photogrammetrie- und eines Laserscannerprojektes ..	175
MECHELKE, K.: siehe KERSTEN, T.P., MECHELKE, K. & HÖNNIGER, C.: Topographische Geländeaufnahme mit terrestrischem 3D-Laserscanner	333
MEINEL, G. & REICHERT, S.: Flächenwirkung des deutschen Autobahnnetzes – Konzept und erste Ergebnisse einer GIS-gestützten Analyse	227
MEISSNER, B., RICHTER, M. & DOLP, S.: FE-basiertes Wurzelschwamm-Monitoring in der Wiederaufforstung der Lausitzer Tagebau-Folgelandschaft	195
MEISSNER, B., WYSS, D., ZAKRZEWSKI, M., TEUSAN, S. & HOFFMANN, H.: GIS gestützte Methoden zur Erfassung von Waldressourcen in	

der Mongolei im Rahmen der Entwicklungszusammenarbeit	187
MEYER, U., SCHMIDT, C. & WEYAND, C.: Webservices – die Basis für den wirtschaftlichen Einsatz von Geodatenservern in verteilten Unternehmenssparten	161
MICHAELIS, B.: siehe KUHN, R.W., MICHAELIS, B., CALOW, R., KASZUBIAK, M. & TORNOW, M.: Echtzeitfähiger Multipositionierungs sensor	601
MÖLLER, M.: siehe GERIGHAUSEN, H. & MÖLLER, M.: Detektion von Schlaggrenzen und der Bodenbearbeitungsrichtung ackerbaulich genutzter Flächen aus höchstauflösenden Fernerkundungsdaten (Quickbird)	303
MONET, S. & TANK, V.: Der Einfluss von Geogasemissionen an der Erdoberfläche auf die thermale Signatur der Austrittsstelle – Untersuchungen mit einem Wärmebildgerät an künstlichen Mofetten	431
MÜLLER, R.: siehe FRANZKE, H.J., FISCHER, C., MÜLLER, R. & WETZEL, H.-U.: Das Strukturmuster des Harzes, ermittelt aus Satellitendaten und digitalen Geländemodellen	391
MÜLLER, R.: siehe SCHROEDER, M., REINARTZ, P., LEHNER, M. & MÜLLER, R.: Validation of stereo-data of the SPOT HRS camera system	483
MULSOW, C. & HANNUSCH, D.: Untersuchungen zu einem flugzeug- basierten Digitalkamera-System mit direkter Sensororientierung	547
MÜNZER, U., SCHARRER, K. WEBER-DIEFENBACH, K. & GUDMUNDSSON, Á.: Integration von ENVISAT_ASAR Daten in ein GIS-System zum Katastrophen-Monitoring im Rahmen des ENVISAT-Projektes [ID 142]	417
NEUKUM, G.: siehe ALBERTZ, J., GEHRKE, S., LEHMANN, H., SCHUMACHER, T. & NEUKUM, G.: Die ersten Blätter des neuen Kartenwerks "Topographic Image Map Mars 1:200 000"	555
NEUKUM, G.: siehe HEIPKE, C., SCHMIDT, R., EBNER, H., SPIEGEL, M. & NEUKUM, G.: Bestimmung der äußeren Orientierung des Mars Express Orbiters	529
NEUKUM, G.: siehe SCHOLTEN, F., GWINNER, K., GIESE, B., OBERST, J., ROATSCH, T., JAUMANN, R., NEUKUM, G. & DAS HRSC-TEAM: HRSC auf Mars Express – Photogrammetrische Datenverarbeitung im planetaren Umfeld	467
NIEKE, J. et. al.: APEX: Current Status of the Airborne Dispersive Pushbroom Imaging Spectrometer	519
OBERLE, A.: Anwendung von GIS und Auswertung von Fernerkundungsdaten zur Bestimmung geeigneter Flächen für Wasserkonzentrationsstechniken in Syrien	287
OBERST, J.: siehe SCHOLTEN, F., GWINNER, K., GIESE, B., OBERST, J., ROATSCH, T., JAUMANN, R., NEUKUM, G. & DAS HRSC-TEAM: HRSC auf Mars Express – Photogrammetrische Datenverarbeitung im planetaren Umfeld	467
OTT, N. & KOLLERSBERGER, T.: Satellitenbildoptimierung und Zielklassenkartierung alterierter Mineralisationen in den zentralen Anden Chiles	449
PAKZAD, K & HELLER, J.: Automatic Scale Adaptation of Semantic Nets	67
PAKZAD, K.: siehe LOHMANN, P., JACOBSEN, K., PAKZAD, K. & KOCH, A.:	

Vergleichende Informationsextraktion aus SAR- und optischen Bildern	581
PIETZSCH, T.: siehe KNÖPPEL, A. & PIETZSCH, T.: Vergleich von Bündelblockausgleichung und sequentieller relativer Orientierung von Bildtripeln zur Roboterpositionierung	593
PRINZ, T.: siehe GLOTZBACH, C. & PRINZ, T.: Bewertung von Landsat-ETM+- und ASTER-Daten im Hinblick auf ihre geologische Aussagekraft am Beispiel des intrakratonen Amadeus Basins, Finke Gorge National Park (Australien)	397
PRINZ, T.: siehe KAROW, T. & PRINZ, T.: Erfassung strukturgeologischer Daten in ariden Gebieten auf der Basis von digitalen Höhenmodellen und hochauflösenden stereoskopischen Luftbildern am Beispiel des intrakratonen Amadeus Basins, Finke Gorge National Park (Australien)	407
PUTZE, T.: Einsatz einer Highspeedkamera zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern in Gasströmungen Messbildern	325
RAGUSE, K., DERPMANN-HAGENSTRÖM, P. & KÖLLER, P.: Verifizierung von Simulationsmodellen für Fahrzeugsicherheitsversuche	367
REICHERT, S.: siehe MEINEL, G. & REICHERT, S.: Flächenwirkung des deutschen Autobahnnetzes – Konzept und erste Ergebnisse einer GIS-gestützten Analyse	227
REINARTZ, P.: siehe SCHROEDER, M., REINARTZ, P., LEHNER, M. & MÜLLER, R.: Validation of stereo-data of the SPOT HRS camera system	483
REINHARDT, W.: siehe SAYDA, F. & REINHARDT, W.: Aktualisierung der Geodaten eines LBS unter Einbeziehung der Nutzer	135
RESSL, C.: Vermessung der Pegasus-Statue auf der Wiener Staatsoper mittels Photogrammetrie sowie terrestrischen Nahbereichs-Laserscannings	349
REULKE, R.: siehe DÖRSTEL, C., REULKE, R. & SCHWEBEL, R.: Berücksichtigung digitaler Kameras im neuen Normentwurf E DIN 18740-4	235
REULKE, R.: siehe KÄSER, M. & REULKE, R.: Laserscanner in der As-Built Dokumentation	129
RICHTER, M.: siehe MEISSNER, B., RICHTER, M. & DOLP, S.: FE-basiertes Wurzelschwamm-Monitoring in der Wiederaufforstung der Lausitzer Tagebau-Folgelandschaft	195
RIEDE, R.: siehe WENDT, A., LUHMANN, T., RIEDE, R. & WEISENSEE, M.: Multiple Bildkorrelation im dreidimensionalen Objektraum mit konvergenten Aufnahmen	59
RIEGER, W.: siehe BAUERHANSL, CH., WÜRLÄNDER, R. & RIEGER, W.: Verbesserte Ableitung von Geländemodellen aus der digitalen Bildzuordnung	41
RIETDORF, A. & GIELSDORF, F.: Kalibrierung von Laserscannern	375
ROATSCH, T.: siehe SCHOLTEN, F., GWINNER, K., GIESE, B., OBERST, J., ROATSCH, T., JAUMANN, R., NEUKUM, G. & DAS HRSC-TEAM: HRSC auf Mars Express – Photogrammetrische Datenverarbeitung im planetaren Umfeld	467
ROSCHER, M.: siehe SCHWALBE, E., MAAS, H.-G., WAGNER, S. & ROSCHER, M.: Akquisition und Auswertung digitaler Hemisphärenbilder für waldökologische Untersuchungen	113

SAUR, G. & KRÜGER, W.: Automatische Feingeokodierung von SAR-Bildern mittels robuster Karte-zu-Bild-Registrierung	105
SAYDA, F. & REINHARDT, W.: Aktualisierung der Geodaten eines LBS unter Einbeziehung der Nutzer	135
SCHÄFER, D.: WebGIS-Schule – Der Einstieg für Schulen und Hochschulen in Geographische Informationssysteme (GIS)	11
SCHARRER, K.: siehe MÜNZER, U., SCHARRER, K., WEBER-DIEFENBACH, K. & GUDMUNDSSON, Á.: Integration von ENVISAT_ASAR Daten in ein GIS-System zum Katastrophen-Monitoring im Rahmen des ENVISAT-Projektes [ID 142]	417
SCHEELE, M., JAHN, H. & SCHUSTER, R.: Geometrische Kalibration von CCD Kameras mittels Beugungsbildern	513
SCHEELE, M.: siehe GRIESBACH, D., BÖRNER, A., SCHEELE, M., SCHEIBE, K., SUJEW, S., BODENMÜLLER, T. & SUPPA, M.: Kombiniertes Einsatz von Zeilenkamera und inertialem Messsystem	539
SCHEIBE, K.: siehe GRIESBACH, D., BÖRNER, A., SCHEELE, M., SCHEIBE, K., SUJEW, S., BODENMÜLLER, T. & SUPPA, M.: Kombiniertes Einsatz von Zeilenkamera und inertialem Messsystem	539
SCHIEWE, J.: Fusion multi-sensoraler Daten zur Extraktion von Oberflächenkanten	279
SCHIEWE, J.: siehe GÄHLER, M., SCHIEWE, J., BOHMANN, G. & JANOWSKY, R.: Kombination von Laserscanningdaten und höchstauflösenden multispektralen Bilddaten zur Biotoptypenklassifizierung	87
SCHMIDT, C.: siehe MEYER, U., SCHMIDT, C. & WEYAND, C.: Webservices – die Basis für den wirtschaftlichen Einsatz von Geodatenservern in verteilten Unternehmenssparten	161
SCHMIDT, R.: siehe HEIPKE, C., SCHMIDT, R., EBNER, H., SPIEGEL, M. & NEUKUM, G.: Bestimmung der äußeren Orientierung des Mars Express Orbiters	529
SCHODLOK, M.C.: siehe SOMMER, T., SCHODLOK, M.C. & WETZEL, H.-U.: Untersuchungen zur spektralen Klassifizierung von Magmatiten und Sedimenten nahe Hami, NW-China mit ASTER-SWIR-Daten	441
SCHOLTEN, F., GWINNER, K., GIESE, B., OBERST, J., ROATSCH, T., JAUMANN, R., NEUKUM, G. & DAS HRSC-TEAM: HRSC auf Mars Express – Photogrammetrische Datenverarbeitung im planetaren Umfeld	467
SCHROEDER, M., REINARTZ, P., LEHNER, M. & MÜLLER, R.: Validation of stereo-data of the SPOT HRS camera system	483
SCHULZE, M. & HAMPEL, U.: Erfassung und Analyse von Prüfkörpern in der Materialprüfung durch Computertomographie	317
SCHUMACHER, T.: siehe ALBERTZ, J., GEHRKE, S., LEHMANN, H., SCHUMACHER, T. & NEUKUM, G.: Die ersten Blätter des neuen Kartenwerks "Topographic Image Map Mars 1:200 000"	555
SCHUSTER, R.: siehe SCHEELE, M., JAHN, H. & SCHUSTER, R.: Geometrische Kalibration von CCD Kameras mittels Beugungsbildern	513
SCHWALBE, E., MAAS, H.-G., WAGNER, S. & ROSCHER, M.: Akquisition und Auswertung digitaler Hemisphärenbilder für waldökologische Untersuchungen	113
SCHWALBE, E.: siehe HOFMANN, A.D. & SCHWALBE, E.: Evaluation automatisch rekonstruierter Gebäudemodelle aus Flugzeugscannerdaten ..	51

SCHWEBEL, R.: siehe DÖRSTEL, C., REULKE, R. & SCHWEBEL, R.: Berücksichtigung digitaler Kameras im neuen Normentwurf E DIN 18740-4	235
SOMMER, T., SCHODLOK, M.C. & WETZEL, H.-U.: Untersuchungen zur spektralen Klassifizierung von Magmatiten und Sedimenten nahe Hami, NW-China mit ASTER-SWIR-Daten	441
SPIECKER, H.: siehe ASCHOFF, T., THIES, M., WINTERHALDER, D., KRETSCHMER, U. & SPIECKER, H.: Automatisierte Ableitung von forst- lichen Inventurparametern aus terrestrischen Laserscannerdaten	341
SPIEGEL, M.: siehe HEIPKE, C., SCHMIDT, R., EBNER, H., SPIEGEL, M. & NEUKUM, G.: Bestimmung der äußeren Orientierung des Mars Express Orbiters	529
STERN, CH.: Ein mobiles Navigations- und Informationssystem für Wanderer	143
STRAUB, B.-M. & WIGGENHAGEN, M.: Ein Multiscalenansatz zur automatischen Ablesung von Wellenhöhen in Videobildern	121
SUJEW, S.: siehe GRIESBACH, D., BÖRNER, A., SCHEELE, M., SCHEIBE, K., SUJEW, S., BODENMÜLLER, T. & SUPPA, M.: Kombiniertes Einsatz von Zeilenkamera und inertialem Messsystem	539
SUPPA, M.: siehe GRIESBACH, D., BÖRNER, A., SCHEELE, M., SCHEIBE, K., SUJEW, S., BODENMÜLLER, T. & SUPPA, M.: Kombiniertes Einsatz von Zeilenkamera und inertialem Messsystem	539
TANK, V.: siehe MONET, S. & TANK, V.: Der Einfluss von Geogas- emissionen an der Erdoberfläche auf die thermale Signatur der Austrittsstelle – Untersuchungen mit einem Wärmebildgerät an künstlichen Mofetten	431
TECKLENBURG, W.: siehe HASTEDT, H., LUHMANN, T. & TECKLENBURG, W.: Bestimmung von Einflussgrößen in der Nahbereichsphotogrammetrie mittels Monte-Carlo-Simulation	359
TEUSAN, S.: siehe MEISSNER, B., WYSS, D., ZAKRZEWSKI, M., TEUSAN, S. & HOFFMANN, H.: GIS ge- stützte Methoden zur Erfassung von Waldressourcen in der Mongolei im Rahmen der Entwicklungs- zusammenarbeit	187
THIES, M.: siehe ASCHOFF, T., THIES, M., WINTERHALDER, D., KRETSCHMER, U. & SPIECKER, H.: Automatisierte Ableitung von forst- lichen Inventurparametern aus terrestrischen Laserscannerdaten	341
TIEDGE, M.: siehe GÖSSELN V. G., BUTHENUTH, M. & TIEDGE, M.: Integration von Daten unterschiedlicher Herkunft	151
TORNOW, M.: siehe KUHN, R.W., MICHAELIS, B., CALOW, R., KASZUBIAK, M. & TORNOW, M.: Echtzeitfähiger Multipositionierungssensor	601
WAGNER, S.: siehe SCHWALBE, E., MAAS, H.-G., WAGNER, S. & ROSCHER, M.: Akquisition und Auswertung digitaler Hemisphärenbilder für waldökologische Untersuchungen	113
WEBER-DIEFENBACH, K.: siehe MÜNZER, U., SCHARRER, K. WEBER-DIEFENBACH, K. & GUDMUNDSSON, Á.: Integration von ENVISAT_ASAR Daten in ein GIS-System zum Katastrophen- Monitoring im Rahmen des ENVISAT-Projektes [ID 142]	417
WEISENSEE, M.: siehe JANSSEN-WEETS, S., FISLER, A., JANTOS, R. & WEISENSEE, M.: Fernerkundung im Labor – Ein Outdoor-Handspektrometer in der Laboranalytik	573
WEISENSEE, M.: siehe WENDT, A., LUHMANN, T., RIEDE, R. & WEISENSEE, M.: Multiple Bildkorrelation im dreidimensionalen	

Objektraum mit konvergenten Aufnahmen	59
WENDT, A., LUHMANN, T., RIEDE, R. & WEISENSEE, M.: Multiple Bildkorrelation im dreidimensionalen Objektraum mit konvergenten Aufnahmen	59
WESER, T.: siehe KÖNIG, G. & WESER, T.: Entwicklungen zu einem adaptiven Lernangebot	19
WETZEL, H.-U.: siehe SOMMER, T., SCHODLOK, M.C. & WETZEL, H.-U.: Untersuchungen zur spektralen Klassifizierung von Magmatiten und Sedimenten nahe Hami, NW-China mit ASTER-SWIR-Daten	441
WETZEL, H.-U.: siehe FRANZKE, H.J., FISCHER, C., MÜLLER, R. & WETZEL, H.-U.: Das Strukturmuster des Harzes, ermittelt aus Satellitendaten und digitalen Geländemodellen	391
WEYAND, C.: siehe MEYER, U., SCHMIDT, C. & WEYAND, C.: Webservices – die Basis für den wirtschaftlichen Einsatz von Geodatenservern in verteilten Unternehmenssparten	161
WIGGENHAGEN, M., ELMHORST, A. & WISSMANN, U.: Digitale Nahbereichsphotogrammetrie zur Objektrekonstruktion der Bremer Hanse Kogge	383
WIGGENHAGEN, M.: STRAUB, B.-M. & WIGGENHAGEN, M.: Ein Multiscalenansatz zur automatischen Ablesung von Wellenhöhen in Videobildern	121
WINTERHALDER, D.: siehe ASCHOFF, T., THIES, M., WINTERHALDER, D., KRETSCHMER, U. & SPIECKER, H.: Automatisierte Ableitung von forst- lichen Inventurparametern aus terrestrischen Laserscannerdaten	341
WIRTH, M.: siehe BÖRNER, A., HETZHEIM, H., KIEMLE, C., LAPORTE, L. & WIRTH, M.: Simulationsansätze für das Wasserdampf-Differential- Absorptions-Lidarsystem WALES	495
WISSMANN, U.: siehe WIGGENHAGEN, M., ELMHORST, A. & WISSMANN, U.: Digitale Nahbereichsphotogrammetrie zur Objektrekonstruktion der Bremer Hanse Kogge	383
WÜRLÄNDER, R.: siehe BAUERHANSL, CH., WÜRLÄNDER, R. & RIEGER, W.: Verbesserte Ableitung von Geländemodellen aus der digitalen Bildzuordnung	41
WYSS, D.: siehe MEISSNER, B., WYSS, D., ZAKRZEWSKI, M., TEUSAN, S. & HOFFMANN, H.: GIS gestützte Methoden zur Erfassung von Waldressourcen in der Mongolei im Rahmen der Entwicklungszusammenarbeit	187
ZAKRZEWSKI, M.: siehe MEISSNER, B., WYSS, D., ZAKRZEWSKI, M., TEUSAN, S. & HOFFMANN, H.: GIS ge- stützte Methoden zur Erfassung von Waldressourcen in der Mongolei im Rahmen der Entwicklungszusammenarbeit	187
ZIEMANN, H. & GROHMANN, D.: Stand des EuroSDR-Projektes Digitale Kameras	491