

PRG

Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation

Organ der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie
und Fernerkundung e.V.

Jahrgang 2001, Heft 5

Hauptschriftleiter:
Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Szangolies

Schriftleiter:
Prof. Dr. Franz K. List und Dr.-Ing. Eckhardt Seyfert

Redaktionsbeirat (Editorial Board): Jörg Albertz, Hans-Peter Bähr, Manfred F. Buchroithner, Ákos Detreköi, Egon Dorrer, Heinrich Ebner, Manfred Ehlers, Wolfgang Förstner, Dieter Fritsch, Armin Grün, Dierk Hobbie, Joachim Höhle, Hermann Kaufmann, Barbara Koch, Gottfried Konecny, Karl Kraus, Thomas Luhmann, Martien Molenaar, Karl Regensburger, Heinz Schmidt-Falkenberg und Bernhard P. Wrobel



E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung
(Nägele u. Obermiller) Stuttgart 2001



DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR PHOTOGRAMMETRIE
UND FERNERKUNDUNG E.V.
Gegründet 1909

Die *Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung e.V.* unterstützt als Mitglieds- bzw. Trägergesellschaft die folgenden Dachverbände:



International Society
for Photogrammetry
and Remote Sensing

DAGM

Deutsche Arbeits-
gemeinschaft für
Mustererkennung e.V.



Alfred-Wegener-Stiftung
(AWS) zur Förderung
der Geowissenschaften

Herausgeber:

© 2001 Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung e.V.

Geschäftsstelle: Dr. Klaus-Ulrich Komp, c/o EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH, Ostmarkstraße 92, D-48145 Münster, e-mail: Praesident@dgpf.de

Internet: <http://www.dgpf.de>

Published by:

E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Johannesstraße 3 A, D-70176 Stuttgart. Tel.: 07 11/62 50 01, Fax: 07 11/62 50 05, e-mail: mail@schweizerbart.de

⊗ Gedruckt auf alterungsbeständigem Papier nach ISO 9706-1994

All rights reserved including translation into foreign languages. This journal or parts thereof may not be reproduced in any form without permission from the publishers.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in dieser Zeitschrift berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Verantwortlich für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren.

ISSN 1432-8364

Hauptschriftleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Szangolies, Closewitzer Str. 44, D-07743 Jena. e-mail: Klaus.Szangolies@t-online.de

Schriftleiter: Prof. Dr. Franz K. List, Freie Universität Berlin, Institut für Geologie, Geophysik und Geoinformation, Malteserstr. 74-100, D-12249 Berlin, e-mail: fklist@zedat.fu-berlin.de und Dr.-Ing. Eckhardt Seyfert, Landesvermessungsamt Brandenburg, Heinrich-Mann-Allee 103, D-14473 Potsdam, e-mail: eckhardt.seyfert@lvermap.brandenburg.de

Erscheinungsweise: 6 Hefte pro Jahrgang.

Bezugspreis im Abonnement: DM 158,00 pro Jahrgang (ab Jahrgang 2002: € 86,-). Mitglieder der DGPF erhalten die Zeitschrift kostenlos.

Anzeigenverwaltung: Dr. E. Nägele, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Johannesstraße 3A, D-70176 Stuttgart, Tel.: 07 11/62 50 01; Fax: 07 11/62 50 05. e-mail: mail@schweizerbart.de

Bernhard Harzer Verlag GmbH, Westmarkstraße 59/59 a, D-76227 Karlsruhe, Tel.: 07 21/944020, Fax 07 21/9440230, e-mail: Info@harzer.de, Internet: www.harzer.de

Printed in Germany by Tutte Druckerei GmbH, D-94121 Salzweg bei Passau

PFG – Jahrgang 2001, Heft 5

Inhaltsverzeichnis

Originalbeiträge

PRINZ, T. & KRÜGER, K.-P.: Evaluation multitemporaler, hochauflösender Fernerkundungsdaten für den Küstenschutz am Beispiel der Insel Usedom	317
THIEMANN, S., WIENEKE, F. & KAUFMANN, H.: Water Quality and Trophic State Analysis Based on Hyperspectral Remote Sensing Data in the Mecklenburg Lake District, Germany	331
HAWLITSCHKA, S., HAMACHER, M. & KÜHBAUCH, W.: Die Erfassung der schlaginternen Verteilung der frischen Biomasse von Wintergerste mittels Radarfernerkundung	345
MAGED, M.: Operational Texture Algorithms for Oil Spill Detection from RADARSAT Data	353
SCHENK, T. & CSATHÓ, B.: Modellierung systematischer Fehler von abtastenden Laseraltimetern	361

Berichte

International Workshop on Recreating the Past – Visualization and Animation of Cultural Heritage	375
OEEPE Workshop „Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models“ in Stockholm vom 1. bis 3. März 2001.....	376
Fernerkundung – GIS Workshop in Salzburg am 3./4.7.2001	378
2. Internationales Symposium »Remote Sensing of Urban Areas« .	379
Neuer internetbasierter Geoinformatik-Lehrgang am FZG Vechta .	381
EARSeL-Bureau neu gewählt	382
Hochschulnachrichten	
Technische Universität Wien	
– Balázs Melykúti.....	382
– Dietmar Legenstein.....	383
– Stephan Winter.....	384
Hochschule Vechta	
– Thomas H. Kolbe.....	384
– Gerhard Gröger.....	386
Humboldt-Universität Berlin	
– Andrea Hoffmann.....	386
Technische Universität Berlin	
– Matthias Hemmleb.....	388
Vorankündigungen	389
Neuerscheinungen	391
Zum Titelbild: Quartärgeologische Übersichtskarte Usedom (LUNG)	392

Evaluation multitemporaler, hochauflösender Fernerkundungsdaten für den Küstenschutz am Beispiel der Insel Usedom

TORSTEN PRINZ & KARL-PETER KRÜGER, Münster

Zusammenfassung: Die Anforderungen an den modernen Küstenschutz beinhalten eine Vielzahl unterschiedlicher Maßnahmen. Neben der technischen Überwachung von Schutzbauwerken ist auch die Evaluation ihrer Wirkung innerhalb eines gefährdeten Küstenabschnittes über längere Zeiträume hinweg von großer Bedeutung. Der Einsatz und die Analyse von hochauflösenden, multitemporalen Fernerkundungsdaten sowie die Verarbeitung der anfallenden Daten in Geoinformationssystemen (GIS) bietet neue Möglichkeiten der Überwachung und Beurteilung von Küstenabschnitten und den in ihnen geplanten oder bereits getroffenen Schutzmaßnahmen. Aus diesem Grunde werden multitemporale, hochauflösende Luft- und Satellitenbilder (Ikonos-II) hinsichtlich der Veränderung der Küstenmorphologie während der letzten 55 Jahre in Testgebieten der Ostseeinsel Usedom untersucht. Die Ergebnisse belegen, dass abhängig von der jeweiligen Datengrundlage unterschiedliche Erosions- und Akkumulationsprozesse sowie ihre Wechselwirkung mit z. T. historischen Küstenschutzbauwerken analysiert und für ein zukünftiges Monitoring genutzt werden können. In Kombination mit GPS-gestützten Geländedaten bezüglich des Zustandes und der Effektivität einzelner Schutzbauwerke führt eine Berücksichtigung derartiger digitaler Fernerkundungsdaten in bereits realisierte Fachinformationssysteme zu neuen Beurteilungskriterien des lokalen Küstenschutzsystems. Aus diesem Grunde wird die Auswertung digitaler hoch auflösender Fernerkundungsdaten, insbesondere geeigneter Satellitendaten, für das Küsten-Monitoring durch die Autoren empfohlen.

Summary: *Evaluation of multisensoral, high-resolution remote sensing data for the coastal zone protection management as exemplary shown for the island Usedom.* Modern coastal zone protection and management systems require a variety of different measures. Beside the technical supervision of protection constructions the evaluation of their effects within an endangered coastal sector over a longer period is of great significance. The application and analysis of high-resolution, multitemporal remote sensing data and its further processing in geoinformation systems (GIS) offers a new possibility for the supervision and examination of coastal zones, respectively planned or already established protection measures. Therefore multitemporal, high-resolution aerial- and satellite-data (Ikonos-II) are being studied with regard to changes of the coastal morphology during the last 55 years at test sites on the German Baltic Sea island Usedom. Depending on the type of data the results verify that different erosional and/or accumulation processes respectively their interaction with partly historical coastal protection constructions can be analysed and used for monitoring tasks in the future. In combination with GPS-supported field data of selected protection constructions, regarding their shape and efficiency, leads the consideration of the digital remote sensing data in already established GIS to new examination criteria for local coastal protection systems. Due to this experience the authors strongly recommend the analysis of digital high-resolution remote sensing data, in particular suitable satellite data for the purpose of coastal monitoring.

1 Einleitung

An vielen Küsten der Welt werden aufwändige Baumaßnahmen ergriffen, um das gefährdete Binnenland vor den Folgen der

Erosion, wechselnder Wasserstände, Strömungsverlagerungen und Sturmfluten mit ihren für den Menschen z. T. katastrophalen Folgen zu schützen. Insbesondere an der Nord- und Ostseeküste treffen wir einen ä-

berst dynamischen Küstenraum an, welcher schon seit jeher seinen Bewohnern all ihr technisches Geschick abforderte, um dort dauerhaft bestehen zu können. Den Küsteningenieuren steht heute, aufbauend auf den Erfahrungen der letzten Jahrhunderte, eine Reihe von typischen Küstenschutzbauwerken zur Verfügung. Deiche, Siele, Buhnen, Lahnungen, Wellenbrecher und in den letzten Jahrzehnten zunehmend die künstliche Sedimentaufspülung sollen unerwünschten Veränderungen der Küste entgegenwirken.

Im Bereich der Ostsee hat sich entlang der deutschen, polnischen und baltischen Küstenlinien seit Ende der letzten Kaltzeit die geologisch einzigartige Form der dynamischen Ausgleichküste mit ihren markanten Nehrungen, Haffs und Boddensystemen gebildet. Obwohl keine nennenswerten Gezeitenkräfte auf die Morphodynamik der deutschen Ostseeküste einwirken, können einzelne Sturmflutereignisse oder anthropogene Eingriffe in den Küstenraum gravierende Folgen für die Stabilität der heutigen Strandlinie mit sich bringen. Um die Risiken einer Küstenverlagerung und evtl. Flutereignisse möglichst niedrig zu halten, müssen alle getroffenen Küstenschutzmaßnahmen regelmäßig überwacht, gewartet und auf ihre Effizienz geprüft werden. In Mecklenburg-Vorpommern werden zu diesem Zweck überwiegend klassische Geländebegehungen entlang der Küste durchgeführt. Die Befunde werden zusammen mit anderen Statusdaten in das Geoinformationssystem *GIS-Küste* des Staatlichen Amtes für Umwelt und Natur Mecklenburg-Vorpommern (StAUN, 1996–2001) in Rostock überführt. Auf Grund der hohen Kosten einer konventionellen Begutachtung wird in den letzten Jahren verstärkt der Nutzen von Fernerkundungsdaten (FE-Daten) für den Zweck der Küstenüberwachung untersucht. Ein Schwerpunkt lag bisher bei den konventionellen Luftbildreihenaufnahmen, deren Erstellung jedoch sehr aufwändig und teuer ist. In der hier vorgestellten Arbeit wird zum ersten Mal der Einsatz hochauflösender, synoptischer Satellitenbilder des Typs Ikonos-II im Zusammenspiel mit anderen Datensätzen für die Aufgaben des Küstenschutzes

für Testgebiete auf der Insel Usedom evaluiert.

1.1 *Naturräumliche und geologisch/geomorphologische Einordnung*

Die Insel Usedom im Bundesland Mecklenburg-Vorpommern ist nach Rügen die zweitgrößte Ostseeinsel Deutschlands. Sie wird im Westen durch den Peenestrom, im Norden durch die Ostsee, im Osten durch die Swine und im Süden durch das Kleine Haff vom Festland abgegrenzt. Gemeinsam mit der polnischen Insel Wollin schließt Usedom das Odermündungsgebiet ein und bildet dessen westliche Flanke. Die Gesamtfläche der Insel beträgt 445 km², wobei der deutsche Teil der Insel 354 km² beträgt. Der Grenzverlauf zu Polen liegt südöstlich von Ahlbeck. Die Untersuchungs- und Testgebiete *Peenemünder Haken* und *Streckelsberg* sind etwa 22 km voneinander entfernt und befinden sich im NW der Insel (vgl. Abb. 1 und Titelbild).

Die NW–SE-Ausdehnung Usedom beträgt 40 km. Es ist zu beachten, dass die Insel in zwei große Teilgebiete untergliedert ist: Zwischen Zempin und Koserow liegt der Usedomer-Ahlbecker SE-Teil. Er ist mit dem kleineren Zinnowitz-Peenemünder NW-Teil durch eine Landbrücke verbunden; letzterer ist in kleinere Halbinseln gegliedert. Von SW greifen das Achterwasser mit 85 km², die Mündung des Peenestromes und das Krumminer Wiek mit 14,9 km² in die Insel ein. Der SE Usedom ist in seinem Küstenverlauf weniger stark gegliedert.

Die Insel besitzt ein quartäres Alter und zählt im geologischen Sinn zu den glaziofluvialen Strukturelementen der *Nordost-deutschen Senke*. Sie ruht dabei auf einem unterschiedlich tief abgesenkten paläozoischen Grundgebirgsfundament und den darauf diskordant folgenden Festgesteinen des Mesozoikums. Das Erdmittelalter wird von mächtigen Lockersedimenten, vor allem pleistozänen Ablagerungen, mit Mächtigkeiten von bis zu 450 m überdeckt (WEISS 1996). Auf Usedom werden Mächtigkeiten des Quartärs von max. 80 m erreicht (DUPHORN 1995). Der Untersuchungsraum ist

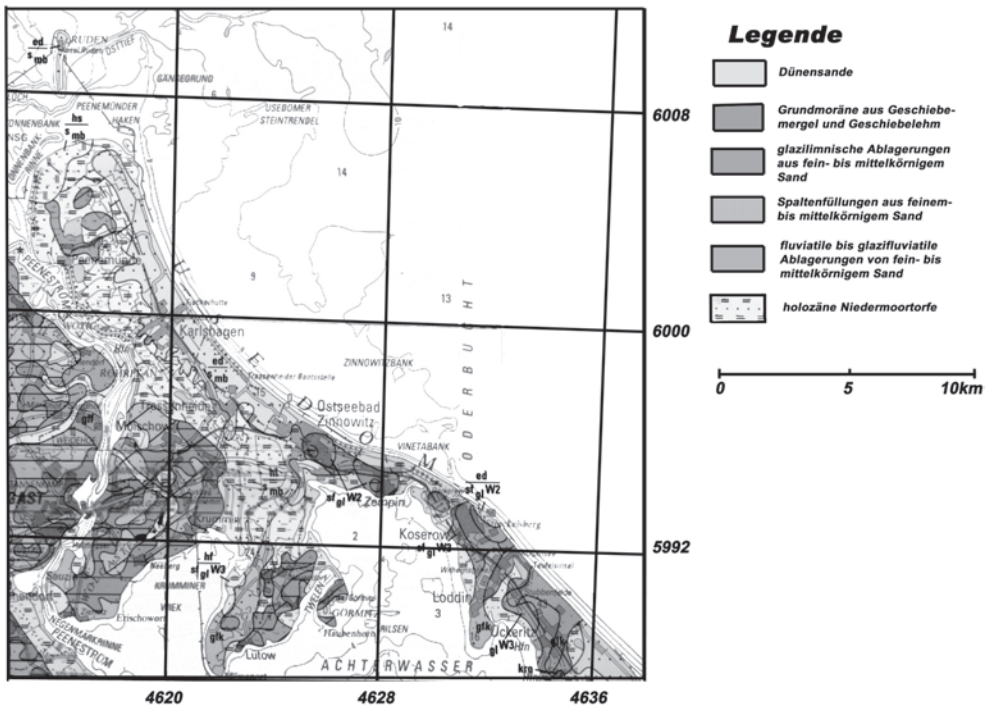


Abb. 1: Quartärgeologische Übersichtskarte des Untersuchungsraumes zwischen Peenemünde und Ahlbeck (modifiziert nach LUNG 1996); siehe auch Titelbild.

Bestandteil der Nord-Rügen-Ost-Usedomer Endmoränenstaffel, welche von der Greifswalder Oie zum *Streckelsberg* im Bereich des heutigen Ostseeschelfs verläuft und im Wesentlichen aus weichsel-kaltzeitlichen Lockersedimenten besteht (KLEWE 1960). Der nordwestliche Teil Usedoms vom *Peenemünder Haken* bis Zinnowitz bilden pleistozäne Inselkerne aus Geschiebemergeln und in der Peeneniederung aus sandigen fluvialen Ablagerungen. An der Ostseeküste liegen Dünensande unterschiedlichen Alters nebeneinander, so dass sie sich in Braun- und Gelbdünen differenzieren lassen (KLEWE 1973). Dieser Dünengürtel reicht vom *Peenemünder Haken* bis Zempin und ist häufig mit Kiefernwald bestanden. Landeinwärts vom Peeneufer, der westlichen Grenze Usedoms, bis zu den Boddengewässern Krumminer Wiek und dem Achterwasser haben sich holozäne Niedermoortorfe gebildet.

Der südwestliche Teil von Mulschow bis Wolgast besteht aus einer Abfolge von mergeligtonigen Grundmoränenmaterial und fein- bis mittelkörnigem Sand aus Spaltenfüllungen der Moräne. Diese Abfolge setzt sich östlich des Krumminer Wiefs bei Lütow fort. Hier sind auch vereinzelt Stauchmoränen anzutreffen, welche mit weiteren pleistozänen Inselkernen bei Zempin vorkommen. Die Endmoränenstaffel wird zwischen Zempin und Koserow von Niedermoortorfen unterbrochen.

Im SE bestehen die Uferbereiche des Achterwassers ebenfalls aus Niedermoortorfen, welche nordwestlich von Ückeritz bis zum Kölpinsee durchreichen. Westlich werden diese Torfe von einem niedrigen Höhenzug aus Grundmoränenmaterial flankiert, welcher von Loddin bis zum Kölpinsee reicht. Hauptsächlich besteht der südöstliche Teil Usedoms aus Stauchendmoränenmaterial und Gletscherzungenbecken des Pommer-

schen Stadiums (14.800–15.200 a) und des Mecklenburger Vorstoßes (13.200–12.800 a). Eine Ausnahme bildet der *Streckelsberg*, der als größte Erhebung (56 m) aus Dünensanden des Pommerschen Stadiums besteht.

Kennzeichnend für die Küsten ist im Osten der mehrmalige Wechsel von Steil- und Flachküstenpartien. Dabei überwiegen im Unterschied zum westlichen Teil Usedom Steilküstenstrecken, während der NE-Teil der Insel vorwiegend aus Grundmoränen und Seesandebenen gebildet wird. Das unterschiedlich stark ausgeprägte Relief der Insel ist somit direkt geologisch bedingt. Durch die marine Erosion der pleistozänen Inselkerne, dem Sedimenttransport und der Akkumulation entstand die heutige Bodenausgleichsküste. Im Verlauf von vier Entwicklungsstadien erhielt sie ihre heutige Gestalt mit Haken und Nehrungen (JANKE et al. 1992). Diese Prozesse folgen einem küstenparallelen, von NW nach SE gerichteten Sedimenttransport, welcher an exponierten Lagen, wie z. B. dem *Streckelsberg*, erosiv, an lee-seitigen geschützteren Lagen, wie z. B. Teilen des *Peenemünder Haken*, reakkumulierend wirkt.

2 Datengrundlage

2.1 Luftbilder

Für den Untersuchungsraum des *Streckelsberg* bei Koserow wird die Küstenmorphodynamik innerhalb zweier Zeitintervalle untersucht: 1944 bis 1992 und von 1998 bis zum Jahr 2000. Letzterer Zeitraum berücksichtigt den umfangreichen Bau von Küstenschutzbauwerken. Für den Zeitraum von 1944 bis 1992 liegen ein panchromatisches (s/w-) Luftbild (1 : 18.000) vom 6. August 1944 und ein Farbluftbild (1 : 20.000) vom 20. Mai 1992 vor. Im August 1998 erfolgte eine weitere Befliegung (Farbaufnahmen, 1 : 20.000) zur Aufnahme aller Küstenschutzbauwerke. Die geometrische Auflösung liegt hier zwischen 1 m und 2 m/Pixel.

2.2 Landsat TM

Zur Generierung multispektraler Information werden zudem archivierte Landsat-5 TM-Daten vom Juli 1989 herangezogen. Die geometrische Auflösung der Aufnahme liegt bei 25 m/Pixel.

2.3 Ikonos-II

Zur Abschätzung der Wirksamkeit der 1998 gesondert am *Streckelsberg* ergriffenen Küstenschutzmaßnahmen wird der Ausschnitt eines Satellitenbildes des neuartigen, hochauflösenden Ikonos-II Satelliten vom 2. Oktober 2000 verwendet. Diese Daten bieten neben der hohen geometrischen Auflösung im panchromatischen Modus (ca. 1 m pro Pixel) auch einen synoptischen Eindruck über eine Fläche von ca. 165 km² und eine erweiterte radiometrische Tiefe von 11 bit. Durch letztere Eigenschaft werden 2.048 Graustufen erreicht, wodurch ein erhöhter Informationsgehalt bezüglich der Geoobjekte erreicht wird.

2.4 Kartenwerke

Zur Bearbeitung (Referenzierung) des Datenmaterials innerhalb des GIS werden digitalisierte, amtliche topographische Karten im Maßstab 1 : 10.000 verwendet. Zur geologischen Interpretation des Untersuchungsraumes dienen die geologischen Karten der quartären Bildung (1 : 200.000) von 1996, die Oberflächenkarte bis 5 m Teufe (1 : 100.000) von 1969 und die preußische geologische Kartierung (1 : 25.000) von 1915/17.

2.5 Geländedaten

Während einer Feldkartierung im August 2000 wurden mittels (D)GPS wichtige morphodynamische Elemente, Bauwerke und schützende Vegetationsareale am Küstensaum zwischen *Peenemünder Haken* und *Streckelsberg* mittels mobiler digitaler Geodatenerfassung (MDE) aufgenommen. Hierbei erfolgte die Attributierung der Geoobjekte direkt GIS-konform in Anlehnung

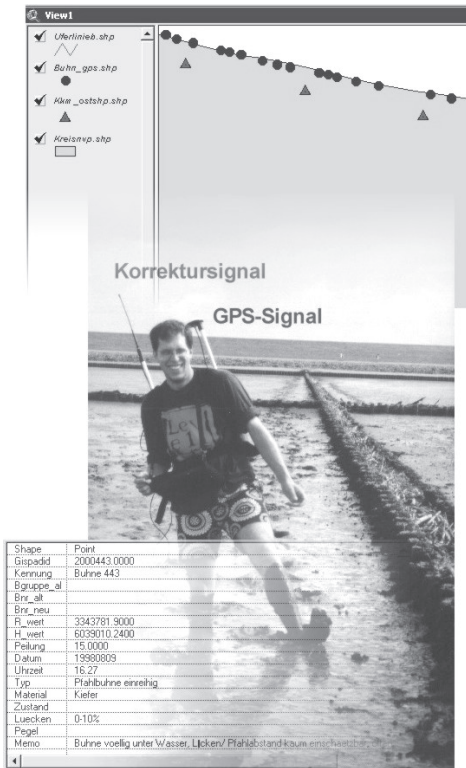


Abb. 2: Mobile, digitale und GIS-konforme Attributaufnahme von Küsten-Buhnensystemen mittels DGPS-Feldcomputer.

an den Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg-Vorpommern (1998) über eine vorbereitete Eingabemaske (Abb. 2) im Gelände. Ziel war die Schaffung von Referenzobjekten/-flächen für die spätere Fernerkundungsanalyse. Für den DGPS-Betrieb im Bereich des Ostsee empfiehlt sich die Einbindung der RTCM-Korrekturdaten des Senders Wustrow auf 314.500 KHz unter Verwendung eines Zusatzempfängers wie z. B. dem *Shipmate RS 5660*. Hier können Lagegenauigkeiten von < 1 m erreicht werden, deren Fehlerbelastung später in der digitalen Karte (1 : 10.000) zu vernachlässigen sind.

3 Methodik

3.1 Datenaufbereitung

Sowohl die analogen FE-Daten als auch das Kartenmaterial wurden hochauflösend (400 dpi) digitalisiert und genau wie die Satellitendaten auf das Gauß-Krüger-System, Krassowsky-Ellipsoid mit geodätischem Datum Pulkow 1942 georeferenziert. Für die Ikonos-Daten wurden zusätzlich notwendige Bildmosaik geschaffen, da der Sensor einen nur 11 km breiten Streifen in

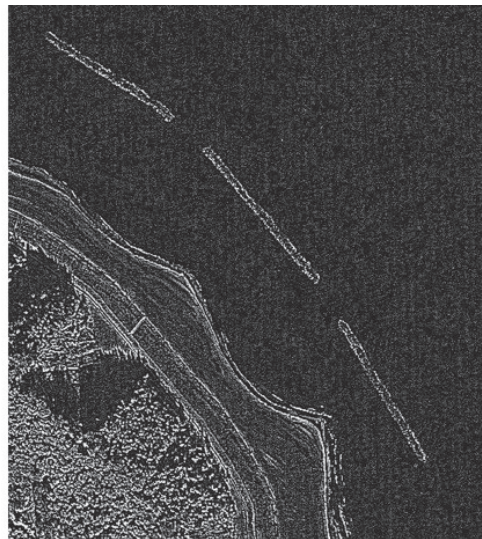


Abb. 3: Hochpass-Filteroperation zur Verbesserung der Visualisierung von Küstenschutzbauwerken in 11 bit Ikonos-II Aufnahmen vom *Streckelsberg* (hier: Wellenbrecher und Dünenschutzpflanzung).

W-O-Erstreckung abtastet und die Rohdaten in zwei separaten Dateien vorlagen. Neben den geometrischen Transformationen wurden an nahezu allen Daten auch radiometrische Transformationen, wie z. B. spezielle Grauwertstreckungen einzelner, besonders wichtiger Areale (AOI's) oder Filter-Operationen zur Verbesserung der Visualisierungsmöglichkeiten von relevanten Geoobjekten durchgeführt (vgl. Abb. 3). Weiterhin wurden auf der Basis aller Rasterdaten mittels der Vektorisierung Polygonzüge wie Kliffkanten, Strandlinien, Bauwerke, Vegetationsflächen etc. erzeugt. An dieser Stelle erfolgte auch die Adaption einiger bereits vorhandener Vektordatensätze aus dem *GIS-Küste* des StaUN in Rostock (1996–2001).

3.2 Digitales Geländemodell (DGM)

Zur verbesserten Analyse der Küstenmorphodynamik (s. Kap. 4.4) und ihrer Beziehung zur unterlagernden Geologie wurde ein digitales Geländemodell (DGM) erstellt. Als Datengrundlage dienten die digitalisierten topographischen Karten (1 : 10.000). Das DGM erstreckt sich auf den Bereiche der Außenküste vom *Peenemünder Haken* bis zu den Pagelunbergen im NO von Ueckeritz. Die Interpolationsgitterweite liegt bei 10 m. Zur Optimierung des DGM wurden sowohl punktuelle Daten, als auch Informationen aus digitalisierten Isohypsen

berücksichtigt. Neben den Vorzügen der großmaßstäbigen Datengrundlage bietet die Verwendung der TK 1 : 10.000 auch Nachteile: So sind die dichten Dünergürtel mit hoher Reliefenergie vom *Peenemünder Haken* bis Zinnowitz/Zempin im Kartenwerk nicht detailgetreu dargestellt, sondern nur generalisiert erfasst. Einer Korrektur im DGM kann nur durch die Verschneidung mit dem Dünenkataster erfolgen. Dennoch bietet das hier berücksichtigte DGM ausreichende und grundlegende Interpretationsmöglichkeiten bezüglich der geologisch/morphodynamischen Zusammenhänge in den Testgebieten sowie einer potenziellen Hochwassergefährdung.

4 Datenanalyse im GIS

4.1 Differenzierungsmöglichkeiten von Geoobjekten

Je nach verwendetem FE-Datensatz unterscheiden sich die Differenzierungsmöglichkeiten der verschiedenen Küstenschutzmaßnahmen deutlich voneinander. Je nach Aufnahmezeitpunkt, Befliegungsmaßstab, geometrischer und radiometrischer Auflösung, aber auch der geometrischen Form und Topologie der Geoobjekte selbst, lassen sich viele Bauwerke in den Testgebieten kartieren und beurteilen. In Tab. 1 sind die Differenzierungsmöglichkeiten einzelner Objekte für das Gebiet *Streckelsberg* nach ihrer Signifi-

Tab. 1: Übersicht über die Erkennbarkeit der für den Küstenschutz relevanten Geoobjekte innerhalb verschiedener FE-Datensätze für das Testgebiet *Streckelsberg*.

	s/w Luftbild	Farbluftbild	Landsat-TM	Ikonos-II
Aufnahmejahr	1944/1983	1992/98	1989	2000
Buhnen	gut	gut	nicht möglich	mäßig
Wellenbrecher	–	sehr gut	–	mäßig
Aufspülungen	gut	gut	mäßig	gut
Küstenschutzwald	mäßig	gut	gut	gut
Deiche	unzureichend	unzureichend	nicht möglich	unzureichend
Strandmauern	mäßig	gut	nicht möglich	gut
Strandlinie/Spülsaum	gut	sehr gut	mäßig	sehr gut
Kliffkante	gut	sehr gut	mäßig	sehr gut
Dünenbepflanzungen	–	nicht möglich	nicht möglich	sehr gut

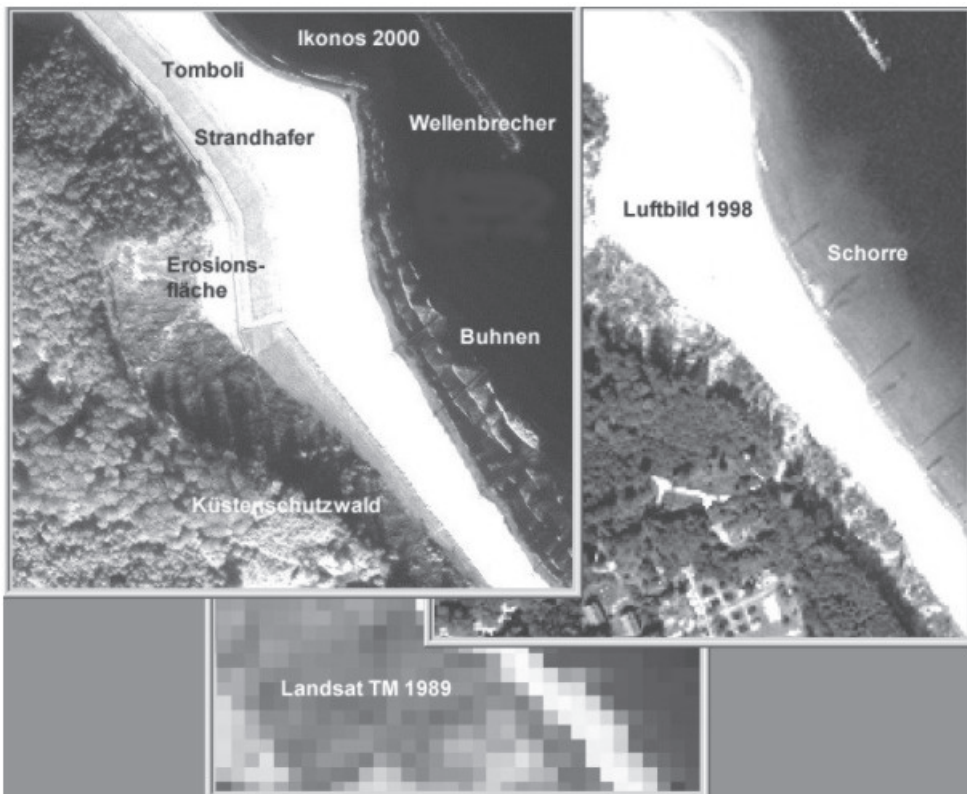


Abb. 4: Unterschiedliche Differenzierbarkeit von Geobjekten des Küstenschutzes in Ikonos-, Luftbild- und Landsat TM-Aufnahmen des Untersuchungsraumes *Streckelsberg* auf Usedom.

kanz in den verschiedenen FE-Daten zusammengefasst. Es wird deutlich, dass ein Datensatz allein keine erschöpfende Informationsquelle für die Beurteilung der Gesamtmaßnahmen darstellen kann. Vielmehr lassen sich nur in einer bewusst gewählten Kombination unterschiedlicher Datenquellen (z. B. panchromatische Ikonos-Aufnahmen mit Farbluftbildern oder IR-Satellitenbildern) wesentliche qualitative bzw. quantitative Aspekte wichtiger Geobjekte erfassen.

Obwohl man zunächst davon ausgehen muss, dass in Luftbildern auf Grund ihrer hohen geometrischen Auflösung fast alle Schutzbauwerke hinreichend gut zu erkennen sind, zeigte sich während der Untersuchung rasch, dass diese pauschale Aussage nicht richtig ist. Gerade im Bereich des Sandstrandes neigen Farbluftbilder häufig

zu Überstrahlungseffekten, welche eine Differenzierung von kleineren Objekten verhindern (z. B. Buhnen oder lichte, junge Dünen-schutzbepflanzungen). Letztere lassen sich hingegen in den synoptisch weiter reichenden, panchromatischen Ikonos-Aufnahmen sehr gut erkennen und beurteilen. Bezüglich der Buhnensysteme im Schorrbereich bieten Luftbilder jedoch die einzige verlässliche Datenquelle, da sich die häufig sehr schmalen Buhnen nur hier kontrastreich von ihrer Umgebung (Wasser!) abheben. Zum Teil lassen sich sogar Aussagen über die Vollständigkeit einer Buhnenreihe treffen (vgl. Abb. 4).

Andere fest installierte Schutzbauten wie Deiche und Strandmauern lassen sich in hochauflösenden Farbluft- oder panchromatischen Ikonos-Aufnahmen nur bedingt differenzieren. Deutlich besser sind die Dif-

ferenzierungsmöglichkeiten erosionsanfälliger Bereiche wie der Kliffkante oder des Strandes bzw. der Schorre. Insbesondere der Verlauf der z. T. deutlich ausgeprägten jungen Hangrutschungen sowie Erosionsrinnen am Kliff oder auch die Tomboli-Bildungen auf der Schorre geben in den Luft- bzw. Ikonos-Aufnahmen Auskunft über das Maß der Küstenmodifikation. Sedimentkörper und Aufspülungen können z. T. noch bis zu einer Tiefe von ca. 5 m unter der Wasseroberfläche auf der Schorre im Farbluftbild erkannt werden.

Anthropogen bedingte Vegetationsflächen sind besonders gut in Luft- und Ikonos-Daten zu unterscheiden (Küstenschutzwald!). Es ist jedoch bemerkenswert, dass sich die jungen, künstlichen Strandhaferanpflanzungen im Primärdünengürtel anschließend in den panchromatischen Ikonos-Daten auf Grund der höheren radiometrischen Datentiefe von 11 bit klar differenzieren lassen. In den Farbluftbildern kommt es hier zur Totalreflexion der Strahlung an den Sandoberflächen der Dünen (s. o.). Hinsichtlich einer spektralen Aufweitung der Unterscheidungsmöglichkeiten hilft hier eine Verschneidung mit IR-Daten des TM-Systems: Die multispektrale Zusatzinformation (Infrarot = IR) erlaubt dann sogar eine Klassifikation der Gewächsorten (z. B. innerhalb des Küstenschutzwaldes). An dieser Stelle sei der Hinweis auf die Bedeutung von zukünftig einzusetzenden hochauflösenden multispektralen FE-Daten für die Zwecke des Küstenschutzes hingewiesen (z. B. 4-kanalige IR-Ikonos-Daten mit 4 m/Pixel).

4.2 Visualisierung und Reihenanalyse

4.2.1 Streckelsberg

Dieser ca. 4 km² große Küstenabschnitt wurde bis 1996/98 lediglich durch historische Schutzbauwerke seit 1858 gegen die erosive Kraft der Meeresströmungen gesichert (WERNICKE 1930). Im Laufe der Vergangenheit unterlag das gesamte Schutzsys-

tem allerdings einem starken Verfall und wurde nur sporadisch ausgebessert (WEISS 1992). Der *Streckelsberg* selbst besteht aus holozänen Dünenstränden mäßiger Festigkeit und stellt deshalb der Erosion eine nur geringe Widerstandskraft entgegen.

Bei der Analyse der FE-Daten und der Verschneidung der aus ihnen abgeleiteten Vektordaten im GIS (Abb. 5a und b) zeigt sich, dass die abtragende Wirkung der Erosion sich an der Ostflanke des *Streckelsberges* am stärksten ausgewirkt. Im Beobachtungszeitraum von 1944 bis 1992 kam es zu einer Rückverlagerung der Strandlinie von etwa 70 m. Dieses Ergebnis deckt sich weitgehend mit Aussagen anderer Autoren (GURWELL & ZIEMER 1991), welche für vergleichbare Küstenabschnitte mittels geodätischer Feldmethoden Küstenrückgänge von 150 m pro 100 Jahre prognostizierten. Von uns durchgeführte Verschneidungs- und Abfrageprozesse, welche die wichtigsten Polygonzüge der Zeitreihenbetrachtungen von Strandlinie, Kliffkante etc. in einem GIS berücksichtigen, belegen, dass im gesamten Untersuchungszeitraum ca. 40.000 m² Strandfläche verloren gingen. Weiterhin kam es zu einer großflächigen Rutschung im Mittelkegel des *Streckelsberges* nach 1950: 1944 war noch eine geschlossene Vegetationsdecke vorhanden, 1953 zeichnet sich eine erste, kleine Denudationsfläche ab, die sich bis heute zu einem großflächigen, vegetationsfreien Hangeinschnitt entwickelt hat. Auf Grund dieser starken Abtragungsprozesse am *Streckelsberg* wurden 1998 neue, umfangreiche Küstenschutzmaßnahmen ergriffen: Passive Maßnahmen, wie der Bau von Buhnen und Aufspülungen, bewirken eine lee-seitige Sedimentakkumulation im Schorrbereich; aktive Maßnahmen, wie der Einsatz von Wellenbrecher, bewirken eine Minderung der Wellenenergie und somit eine geringere Erosionskraft. Gemäß der „natürlichen“ Wirkung von Wellenbrechern, welche unter Idealbedingungen zur Ausbildung von Tomboli streben (WEISS 1991), sind die größten morphologischen Veränderungen an den Aufspülungsflächen zu erwarten. Diese sollten in Lee der Wellenbrecher Akkumulationsflächen und zwi-

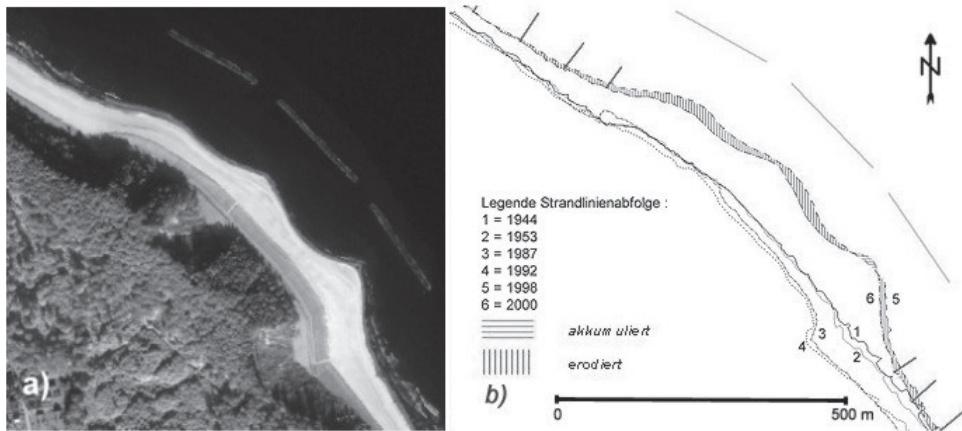


Abb. 5: Zeitreihenanalyse relevanter Küstenlinien (b) auf der Basis verschiedener FE-Daten für den Küstenschutz am *Streckelsberg* von 1944 bis 2000. Beispielhaft dargestellt ist die Ikonos-Aufnahme vom Oktober 2000 (a).

schen den Bauwerken Erosionserscheinungen zeigen.

Die aktuellen Ikonos-Daten (Abb. 5a) belegen, dass die prognostizierten Sedimentverlagerungen während der zurückliegenden zwei Jahre nur bedingt eingetroffen sind. Wie auch zuvor kam es zu einer großflächigen Erosion im Untersuchungsraum, bemerkenswerterweise auch entlang der Aufspülungsareale in Lee der Wellenbrecher. Das Ausmaß der Erosion beträgt hinsichtlich der künstlich aufgespülten Ursprungsflächen etwa 12.000 m^2 . Die veränderte Form der Schorre legt den Schluss nahe, dass besonders im Bereich der Durchflüsse zwischen den Wellenbrechern starke Strömungen entstehen, welche entlang der Strandlinie zur Ausbildung von Tomboli führen. Eine kleinflächige Reakkumulation der Sedimente konnte nur im Lee des südöstlichen Wellenbrecher bestätigt werden.

Obige Untersuchungen zeigen, dass eine deutliche Veränderung im Sedimenttransport und der Erosionsprozesse während der letzten 56 Jahre stattfand; so kam es im Zeitraum von 1944 bis 1992 maßgeblich zur Abtragung der Ostflanke des *Streckelsberges*. Der spätere Bau von Küstenschutzwerken (Buhnen, Wellenbrecher) bewirkte Akkumulationsprozesse, aus denen ein sehr geringer Flächengewinn (300 m^2) resultiert.

Durch die zusätzliche künstliche Aufschüttung von Material an der Westflanke des *Streckelsberges* und im vorgelagerten Schorrbereich konnte nun erheblich mehr Material abgetragen werden. Hieraus ergeben sich Erosionsflächen, welche in den Jahren zuvor nicht so deutlich ausgeprägt waren, die sich aber lediglich im vorgelagerten, künstlich geschaffenen Strandareal befinden. Eine unmittelbare Gefährdung des *Streckelsberges* kann somit nur temporär abgewendet werden. Diese Ergebnisse decken sich mit theoretischen Betrachtungen von WEISS (1991), welcher betont, dass Aufspülungen selten einmalige Maßnahmen seien, sondern in der Regel alle 6 bis 7 Jahre durchgeführt werden müssten.

4.2.2 Peenemünder Haken

Der Untersuchungsraum am *Peenemünder Haken* umfasst hauptsächlich nur das zur Ostsee und dem Durchfluss zum Greifswalder Bodden exponierte Gebiet, die Peenemündung selbst wurde nicht berücksichtigt. Der Untersuchungsraum nimmt eine Fläche von ca. 6 km^2 ein, in dem alle für den Küstenschutz relevanten Geoobjekte der Küste auf der Basis der FE-Daten aufgenommen wurden (vgl. Abb. 6a und b). Bei der Analyse der FE-Daten und der Verschneidung

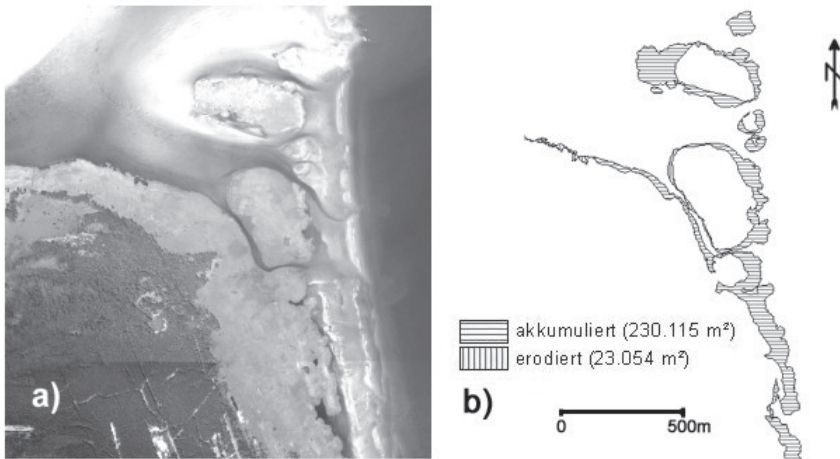


Abb. 6: Zeitreihenanalyse relevanter Küstenlinien (b) auf der Basis verschiedener FE-Daten für den Küstenschutz am *Peenemünder Haken* von 1953 bis 1998. Beispielhaft dargestellt ist das Luftbild von August 1998 (a).

der aus ihnen abgeleiteten Vektordaten im GIS zeigt sich eine deutliche Veränderung des Sedimentationsraumes von 1953 bis 1998. Es können Rückschlüsse bezüglich der Verlagerung von Strandlinien sowie die Aufnahme von Erosions- und Akkumulationsflächen getroffen werden. In der Bilanz wird deutlich, dass es größere akkumulative Flächen als erodierte Areale gibt. Die ausgeprägteste Zone positiven Sedimenthaushaltes ist die Lee-Seite des *Peenemünder Hakens*. Aber auch auf den vorgelagerten kleineren Inseln im Norden des Hakens sind im Verlauf der Jahre deutliche Flächengewinne zu verzeichnen. In den Luftbildern von 1998 sind Letztere hauptsächlich am östlichen Küstensaum nachweisbar, können aber, auf Grund lokaler Strömungsverhältnisse, auch vereinzelt in westlichen Inselarealen auftreten. Der Gesamtumfang der in den FE-Daten nachweisbaren Landgewinne beträgt ca. 230.100 m². Es resultiert eine seewärtige Verlagerung der Strandlinie von bis zu 100 m am Festland und über 200 m auf den vorgelagerten Inseln. Dieser Zuwachs dokumentiert sich auch in einer hohen Bestandsdichte von Pionierpflanzen: 1953 (historisches Luftbild) deuten helle, überstrahlende Reflexionen auf offene Sandflächen hin;

1998 sind diese Flächen bereits dauerhaft mit Strandgräsern und Schilf bestanden.

Die Küstenabschnitte mit dominierenden Erosionserscheinungen befinden sich im Nordwesten, direkt am Greifswalder Bodden oder an luvseitigen Strandabschnitten der vorgelagerten Inseln. Dort bieten insbesondere die Ablagerungen des holozänen Niedertoorfmoores wenig Erosionsresistenz gegenüber der hier zunächst NE gerichteten Strömung der Peene. Die erodierte Gesamtfläche beträgt nach Analyse der FE-Daten etwa 23.000 m². Somit ergibt sich im Untersuchungsraum des *Peenemünder Haken* ein Verhältnis von Akkumulation zu Erosion von 11 : 1. In der Gesamtbilanz überwiegen mit insgesamt 207.000 m² natürlichem Landgewinn akkumulative Prozesse.

Obige Untersuchungen belegen, dass der Einsatz von anthropogenen Küstenschutzmaßnahmen, durch die naturräumliche Morphodynamik der Region *Peenemünder Haken*, an ausgedehnten Strandabschnitten nicht erforderlich ist, da die Strandlinie durch akkumulative Prozesse stetig seewärts verlagert wird. An den wenigen Strandabschnitten des Festlandes, an welchem Erosionsprozesse wirken, wurden teilweise Deiche als Küstenschutzmaßnahme errich-

tet. Den erosiven Prozessen auf den vorge-lagerten Inseln wird nicht entgegengewirkt.

4.3 Einbindung eines DGM

Die Einbindung eines DGM in das GIS erlaubt die Visualisierung von geologisch-/morphodynamischen Aspekten im Untersuchungsraum. In Abb. 7 (a, b) ist der Küstenabschnitt vom *Streckelsberg* über den Kølpinsee bis zu den Pagelunsbergen bei Stubbenfelde in Kombination mit der geologischen Karte (a) und den Ikonos-Daten (b) dargestellt. Es lässt sich die reliefprägende Wirkung der glazilimnischen Mittel- und Feinsande des Weichselglazials gegenüber den holozänen Niedermoortorfen in der Niederung vom Achterwasser zum Kølpinsee erkennen. Dort wo Stauch- und Grundmoränenmaterial ansteht, sind auch kleinräumige morphologische Hochgebiete entwickelt (meist in Form N-S streichender

Sandrücken). Weiterhin wird deutlich, dass die Erhebung des *Streckelsberges* und seiner Ausläufer ausschließlich aus Sanden besteht und ihre morphologische Ausprägung nicht als Resultat besonderer Erosionsresistenz gegenüber der Umgebung gesehen werden darf. Vielmehr hat die Ostsee an dieser Stelle einen mächtigeren Ablagerungsbereich glazilimnischer Lockersedimente angeschnitten, die ohne anthropogene Sicherungsmaßnahmen sicher stärkerer Erosion ausgesetzt wären. Dies gilt insbesondere für Areale, deren schützende Pflanzendecke bereits zerstört wurden – so gut mittels FE-Daten und DGM am *Streckelsberg* dokumentierbar (hier bilden sich bereits gefährliche Erosionsrinnen bzw. -fächer aus).

In einem eingeschränkten Umfang lässt sich das DGM auch als Grundlage zur Simulation extremer Sturmhochwasserereignisse heranziehen. So können die Regionen und Flächenanteile ermittelt werden, welche

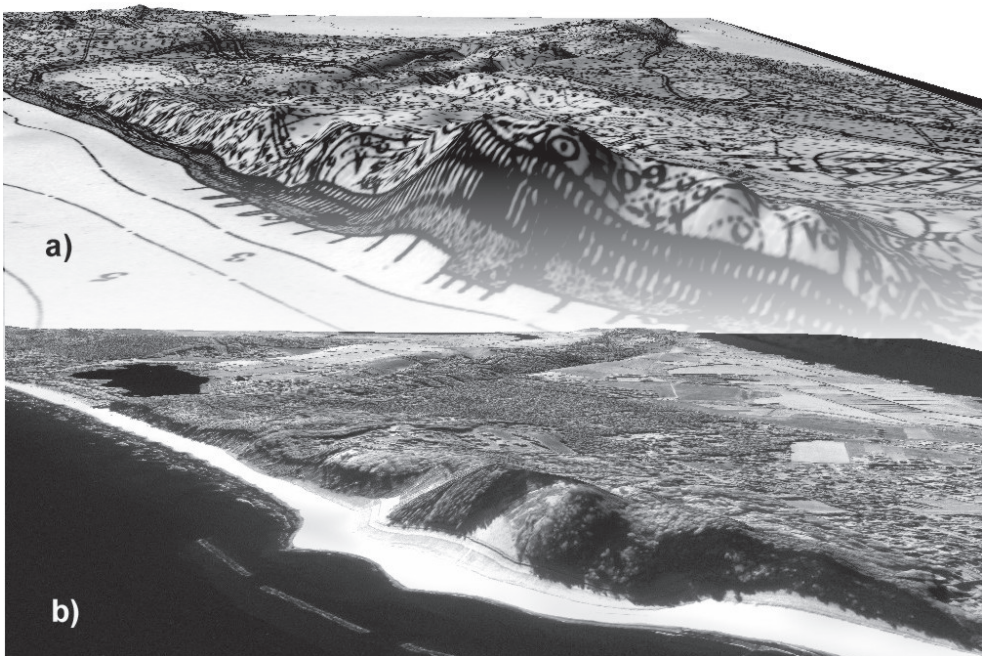


Abb. 7: Digitales Geländemodell (DGM, 3- und 2-fach überhöht) des Testgebietes *Streckelsberg* mit geologischer Information (a) und hochauflösenden Ikonos-Daten (b). Die Verzerrungen in a) sind auf die ungenaue geologische Kartengrundlage von 1915 zurückzuführen. Deutlich zu erkennen ist jedoch die Morphologie der Grund- und Stauchmoränenzüge.

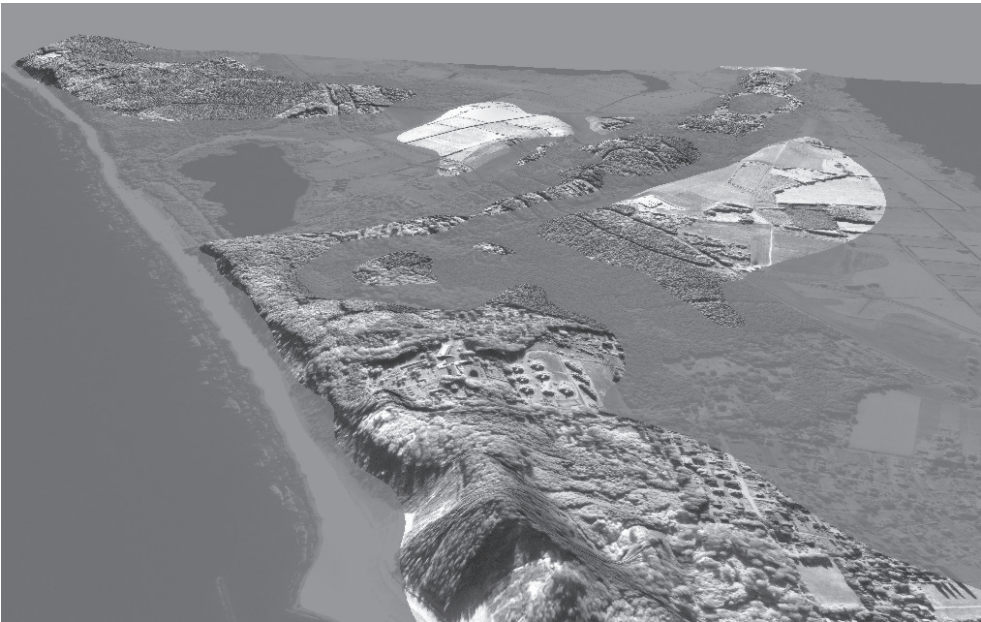


Abb. 8: Digitales Geländemodell (3-fach überhöht, Blickrichtung SE) mit Ikonos-Daten und simulierten maximalem Hochwasserstand von 1872 (Bemessungswasserstand = 3,40 m üMW) im SE des Testgebietes *Streckelsberg*. Weite Teile des Hinterlandes wären bei einem Sturmhochwasser von einer Flutkatastrophe betroffen (Ausnahme: Die Grund- und Stauchmoränenzüge).

bei einem maximalen Hochwasserstand (hier: Jahrhunderthochwasser von 1872 mit ca. 3,50 m üMW als Bemessungsgrundlage der Küstenschutzbauwerke nach KOLP 1955) überflutet würden. In Abb. 8 kann ein solcher Wasserstand als Simulation betrachtet werden. Es zeigt sich, dass bis auf die Grund- und Stauchendmoränenzüge im Sturmflutfall weite Gebiete Usedom überflutet werden. Insbesondere dienen die Niederungen zwischen dem *Streckelsberg* im NW und den Pagelunsbergen im SE als Flutungspforte in Richtung Achterwasser und Bodden. Die direkten Folgen wären neben den negativen Auswirkungen auf den anthropogenen Siedlungsraum, auch die kleinräumigen Veränderungen im Sedimenthaushalt der Ausgleichsküste sowie die z. T. irreversiblen Modifikationen der Außenküstenmorphologie zu nennen. In diesem Bereich müssen deshalb die Küstenschutzbauwerke besonders gut überwacht und ggf. ausgebaut werden. Die Bedeutung des *Streckels-*

berges sowie seiner glazigenen Ausläufer als natürliches, geomorphologisches ‚Küstenschutzbauwerk‘ wird in der Simulation bestätigt.

5 Schlussfolgerungen

Wir konnten zeigen, dass mittels Einbindung von FE-Daten in ein Informationssystem (Abb. 9) für den Küstenschutz wichtige erosive bzw. akkumulative Vorgänge entlang zweier Testgebiete auf Usedom (*Peenemünder Haken* und *Streckelsberg*) in ihrem morphodynamischen, historischen Kontext zu bewerten sind. Obige Untersuchungen belegen den hohen Stellenwert von unterschiedlichen FE-Daten als wichtiges Bindeglied in der Beurteilung von langfristig angelegten Küstenschutzmaßnahmen innerhalb eines Fachinformationssystems. Insbesondere ist im Vorfeld zukünftiger Planungen die Auswertung von historischen Fernerkundungszeitreihen sinnvoll, soweit die

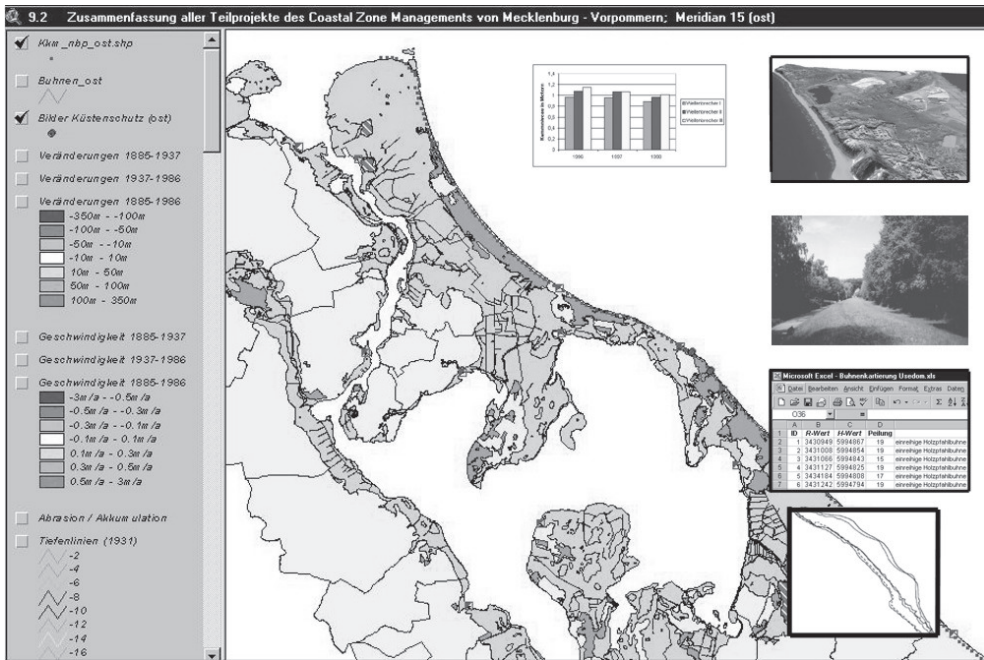


Abb. 9: Ausschnitt aus dem GIS-Küste für den Bereich des Untersuchungsraumes Usedom. Fernerkundungsdaten, DGM, Geländebefunde sowie Sachinformationen dienen als Planungsgrundlage für den effizienten und ökonomischen Küstenschutz.

Daten eine hinreichende geometrische/radiometrische Auflösung besitzen. Für aktuelle Betrachtungen können moderne Satellitendaten, wie z. B. Ikonos-Aufnahmen, einen befriedigenden, synoptischen Ersatz von aufwändigen Luftbildreihen darstellen. Hier sei auch an die zusätzliche Möglichkeit einer multispektralen Ikonos-II Befliegung mit reduzierter geometrischer Auflösung (4 m pro Pixel) aber hinreichender IR-Information als Ersatz der klassischen TM-Aufnahmen hingewiesen. Mit Hilfe moderner Bildverarbeitungstechniken sind so für weite Areale die Veränderungen der Küstenmorphologie rasch erfassbar. Zusätzlich wird der zeitliche Aufwand für die notwendigen Ortsbegehungen minimiert, da die FE-Daten auch als Planungs- und Bewertungsgrundlage für Geländetätigkeiten geeignet sind. Unter zusätzlicher Berücksichtigung eines DGM's können Rückschlüsse auf die oft geologisch bzw. morphologisch bedingte Erosionsresistenz eines Küsten-

abschnittes und einer möglichen Hochwassergefährdung gezogen werden. Geländereferenzdaten sollten verstärkt in wenigen ausgewählten Testgebieten mittels Feldcomputer GIS-konform gesammelt werden. Hier wird eine direkte (D)GPS-gestützte digitale Aufnahme empfohlen, da so der spätere Attributdatentransfer in das GIS zu vereinfachen bzw. die Fachinformation bereits im Gelände vorzuhalten ist.

Hinsichtlich der Küstenschutzanstrengungen im Bereich des *Streckelsberges* gibt es nach unseren Erkenntnissen keinen Anlass zur langfristigen Entwarnung. Trotz enormer bisheriger Bemühungen zum Schutze des Küstenabschnittes überwiegt nach wie vor eine größtenteils defizitäre Sedimentationsbilanz. Weitere Sedimentaufspülungen sowie der Ausbau des Bühnensystems und der intensive Schutz der strandnahen Vegetationsgürtel wird durch den Menschen folgen müssen.

Danksagung

Die Autoren möchten den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des StAUN in Rostock, insbesondere Dr. BIRGA GURWELL und Dr. LARS TIEPOLT der Abteilung Küste, für ihre Unterstützung und die Bereitstellung wichtiger Daten und Literatur danken. Hinsichtlich der notwendigen Recherchen nach historischem Karten- und Bildmaterial sei den Luftbildstellen im Bundesarchiv Berlin und dem Landesvermessungsamt in Schwerin gedankt.

Literatur

- DUPHORN, K., 1995: Die Deutsche Ostseeküste. – Sammlung geologischer Führer, **88**, 281 S., Borntraeger, Stuttgart.
- GURWELL, B. & WIEMER, R., 1991: Die Ostseeküste in Mecklenburg-Vorpommern. – Wasser und Boden, **43**: 13–16, Paul Parey-Verlag, Berlin.
- KLIEWE, H., 1960: Die Insel Usedom in ihrer spät- und nacheiszeitlichen Formenentwicklung. – 266 S., VEB Deutscher Verlag d. Wissenschaften, Berlin.
- KLIEWE, H., 1973: Zur Genese der Dünen im Küstenraum der DDR. – Petermanns Geographische Mitteilungen, H. **3/73**: 161–168, Haack-Verlagsgesellschaft, Gotha.
- KOLP, O., 1955: Sturmflutgefährdung der deutschen Ostseeküste zwischen Trave und Swine. – 170 S., Seehydrographischer Dienst der DDR, Stralsund.
- LUNG, 1996: Karte Mecklenburg-Vorpommern 1 : 200.000 der quartären Bildungen: Oberflächen bis fünf Meter Tiefe. – Blatt Stralsund, Schwerin.
- JANKE, W., KLIEWE, H. & STERR, H., 1992: Holo-zäne Genese der Boddenküste Mecklenburg-Vorpommerns und deren künftige klimabedingte Entwicklung. – Klimaänderung und Küste, 137–151, Springer-Verlag, Berlin.
- Ministerium für Bau, Landesentwicklung und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern (Hrsg.), 1998: Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg-Vorpommern. – 114 S., Schwerin.
- WEISS, J., 1991: Küstenschutzbauwerke an der Ostseeküste von Mecklenburg-Vorpommern. – Wasser und Boden, **43**: 206–224, Paul Parey-Verlag, Berlin.
- WEISS, D., 1992: Schutz der Ostseeküste von Mecklenburg-Vorpommern. – Historischer Küstenschutz, DVWK (Hrsg.), Konrad Wittwer-Verlag, Stuttgart.
- WEISS, W. (Hrsg.), 1996: Mecklenburg-Vorpommern. – Länderprofile, S. 27–41., Klett-Perthes-Verlag, Gotha.
- WERNICKE, W., 1930: Die Küste der Inseln Usedom und Wollin – Vom Peenemünder Haken bis zum Swinehöft. – 113 S., von Bruncken & Co., Greifswald.

Anschriften der Verfasser:

Dr. rer. nat. Dipl.-Geol. TORSTEN PRINZ

Dipl.-Geogr. KARL-PETER KRÜGER

Informations-Verarbeitungs-Versorgungseinheit (IVV-FB14)

Geowissenschaften

Robert-Koch-Straße 26, D-48149 Münster

Tel.: 0251-83-300 15, Fax: 0251-83-397 63

e-mail: prinz@uni-muenster.de

http://ivvgeo.uni-muenster.de

Manuskript eingereicht: Mai 2001

Angenommen: Juni 2001

Water Quality and Trophic State Analysis Based on Hyperspectral Remote Sensing Data in the Mecklenburg Lake District, Germany

SABINE THIEMANN, Oberpfaffenhofen, FRIEDRICH WIENEKE, München &
HERMANN KAUFMANN, Potsdam

Abstract: Secchi disc depth and chlorophyll-a content are widely used indicators for the trophic state of lakes. Secchi disc depth and chlorophyll-a are calculated from hyperspectral remote sensing data to estimate the trophic state of 25 lakes. A remote sensing database was established for the Mecklenburg Lake District in 1997 comprising field reflectance and analytical reference data on several distinct dates and airborne hyperspectral data recorded by the Compact Airborne Hyperspectral Imager (casi).

The in situ reflectance spectra were analysed to develop and test a model for hyperspectral determination of the phytopigments chlorophyll-a, phycocyanin, and carotenoids, and Secchi disc depth. For Secchi disc depth the area between a base line and the spectrum from 400 nm to 750 nm was calculated and correlated to the Secchi disc depth measured in situ. Chlorophyll-a concentration was quantified using the reflectance ratio at 705 nm and 678 nm and showed a linear relationship to chlorophyll-a content from laboratory spectro-photometric measurements. The accessory phytopigments carotenoids and phycocyanin were determined from the spectral data using their absorption depths at 485 nm and 624 nm, respectively. The algorithms have then been transferred to the hyperspectral airborne data.

This study presents an application of hyperspectral remote sensing data in the quantitative analysis of several water constituents. From Secchi disc depth and chlorophyll-a concentration trophic state has been analysed for the first time for all lakes in this district.

Zusammenfassung: *Analyse von Wasserqualität und Trophie-Status mit hyperspektralen Fernerkundungsdaten in der Mecklenburger Seenplatte.* Sichttiefe und Chlorophyll-Gehalt werden in der Limnologie häufig als Indikatoren für die Einschätzung des Trophie-Status von Seen verwendet. Beide Größen wurden in dieser Studie aus hyperspektralen Fernerkundungsdaten abgeleitet, um den Trophie-Status von 25 Seen zu bestimmen. In der Mecklenburger Seenplatte wurde 1997 eine Fernerkundungs-Datenbasis aufgebaut, die aus in situ-Reflexionsspektren, analytischen Referenzdaten und flugzeuggetragenen Hyperspektraldaten des „Compact Airborne Spectrographic Imager“ (casi) besteht.

Aus den in situ-Reflexionsdaten wurden semiempirische Regressionsmodelle zur quantitativen Bestimmung der Phytopigmente Chlorophyll-a, Phycocyanin und Carotinoide sowie der Sichttiefe erstellt. Für die Sichttiefe wurde die Fläche zwischen einer konstruierten Basislinie und dem Spektrum zwischen 400 nm und 750 nm berechnet. Diese Werte und die in situ gemessene Sichttiefe stehen in negativ-exponentiellem Regressions-Zusammenhang. Die Chlorophyll-a-Konzentration wurde über das Reflexionsverhältnis bei 705 nm und 678 nm quantifiziert und weist eine lineare Beziehung mit dem Chlorophyll-Gehalt aus spektro-photometrischen Laboranalysen auf. Der Gehalt an akzessorischen Phytopigmenten, Carotinoide und Phycocyanin, wurden aus den Spektren durch ihre Absorptionstiefe bei 485 nm bzw. 624 nm ermittelt. Diese Algorithmen wurden anschließend auf die hyperspektralen Flugzeugdaten übertragen.

Diese Studie zeigt die Anwendbarkeit von Hyperspektraldaten für die quantitative Analyse von gleichzeitig mehreren Wasserinhaltsstoffen. Aus Sichttiefe und Chlorophyll-Gehalt wurde der Trophie-Status aller Seen erstmalig für denselben Zeitpunkt abgeleitet.

Introduction

Secchi depth and chlorophyll content are widely used as indicators of trophic state (CARLSON 1977, WETZEL 1983, VOLLENWEIDER 1989, SCHWOERBEL 1993). Both are characterised by individual spectral features in the visible (VIS) and near infrared (NIR) wavelength range between 400 nm and 750 nm and thus are detectable by remote sensing methods. The advantage of these methods is the synoptic view that allows the analysis of extensive areas at a given date.

The landscape of the German state Brandenburg is characterised by several lake districts with more than 2000 lakes. Since 1992 the Institute of applied Fresh Water Ecology in Brandenburg has been comprehensively recording and assessing the standing waters of the state. However, the updating of the lake database is starting to pose an immense problem. Water monitoring by means of remote sensing is therefore being investigated to help maintain an overview of the changes of the lakes' ecosystems. This study has been carried out for the Brandenburg part of the Mecklenburg Lake District.

Study Area

The Mecklenburg Lake District comprises more than 2000 lakes located 70 km northwest of Berlin, about half the distance to the Baltic Sea (Fig. 1). The test area of about 100 km² focuses on 25 lakes close to the city

of Rheinsberg in the southern part of the lake district. The centre longitude and latitude are 12°50' E and 53°09' N.

The landscape is characterised by glacial landforms from the Weichsel ice age which lasted until about 18000 years before present. The ice sheet propagated from Scandinavia over the Baltic Sea. To the west, the test area is marked by terminal moraines of the Frankfurt stadial. To the east the river *Rhin* now uses a large glacial valley (KRAUSCH et al. 1974, STACKEBRANDT et al. 1997).

The lakes are formed in former dead ice kettle holes of various sizes, depths, and catchment areas. Lake *Wumm* (Fig. 1-1) for example is up to 38 m deep and does not have any surface supply or drainage. Lake *Bramin* (4) is in filling and its depth does not exceed 3 m. Most of the lakes are interconnected by rivers or canals. The lakes *Prebelow* (13), *Tietzow* (14), *Schlaborn* (15), *Rheinsberg* (16), and *Grienerick* (17) for example are linked to the river *Rhin*. Trophic state varies widely between the lakes. Lake *Wumm*, an oligo- to mesotrophic lake surrounded by forests, rarely exceeds chlorophyll-a contents of 3 µg/l. Secchi disc depth was measured between 6 m and 8.5 m (ARP 1997, THIEMANN & KAUFMANN 1998). In contrast, the lake *Bramin* reaches Secchi disc depths around 0.3 m and chlorophyll-a concentrations between 60 µg/l and 100 µg/l. All the other lakes vary between those two extremes (see Tab. 1).

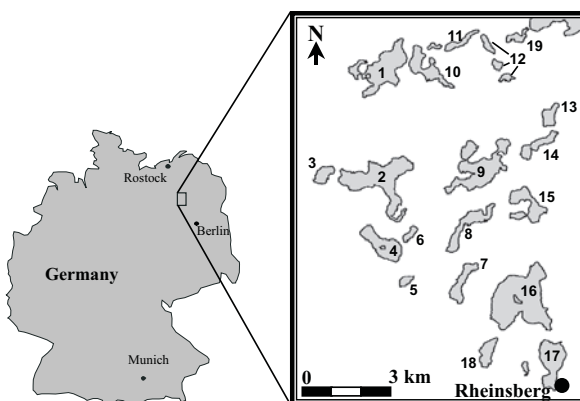


Fig. 1: Location of the test area – corresponding lake names and parameters are to be found in Tab. 1.

Data and Pre-Processing

In Situ Reference Data

Secchi disc depth and water samples for the analysis of chlorophyll-a were taken on four dates in May, June, early September, and end of September 1997 for five selected lakes within the test area. The measurements were taken at two to four different points on each lake. However, the results showed that the differences within each lake were minor in comparison to the lake-to-lake variances.

Secchi disc depth or Secchi disc transparency is usually measured with a white disc (diameter 25 cm) which is lowered into the water body on the shaded side of a boat as far as it is just still visible (WETZEL 1983, SCHWOERBEL 1994). It is influenced by scattering and absorption within the visible wavelength spectrum of all dissolved and particulate compounds, predominantly phytoplankton, re-suspended material, and humic and fulvic substances (HÅKANSON 1995). Secchi disc depth is a general measure of the

underwater supply of light for plants and an important overall indicator of trophic state (GUNKEL 1994).

Chlorophyll-a is a phytopigment present in all algae species. It is regarded as one main indicator of trophic state (CARLSON 1977, VOLLENWEIDER 1989, DIN 38 412). The water samples were taken with an integrating water sampler down to the Secchi disc depth and filled into 1 l-bottles of polyethylene. The samples were kept as cool and dark as possible to reduce further bioproduction after sampling. Chlorophyll-a was analysed for all sampling dates in the laboratory using spectro-photometric measurements of the absorption efficiency at 665 nm after extraction in 90 % ethanol according to DIN 38 412 (1986). The results were corrected for phaeopigments after acidification with hydrochloric acid and re-measurement of the absorption efficiency.

The analyses of other phytopigments unfortunately could not have been made available.

Tab. 1: Lake parameters.

No.	Lake Name	max. Depth [m] ¹	Shore Development [1] ²	Trophic State (Klapper) ³	Secchi Depth [m] (9/1/97) ⁴	Chlorophyll-a [µg/l] (9/97) ⁴	Humic Subst. [mg/l] (9/97) ⁴
1	Wumm	38.0	2.87	1.7	7.5	2.7	5.4
2	Zechlin	36.0	2.73	2.7	2.8	7.1	4.4
3	Schwarz	8.0	1.46	2.5			
4	Bramin	2.5	1.98	3.0	0.5	69.9	4.3
5	Kagar	3.0	1.43	3.3	> 0.3	99.8	6.0
6	Zermitten	7.0	1.56	2.5		32.8	3.4
7	Pätsch	18.0	2.06	2.5		5.5	4.7
8	Dollgow	11.0	2.58	2.5		44.0	3.6
9	Zootzen	21.0	3.08	2.3	1.5	15.7	2.3
10	Twern	35.0	2.61	2.5			
11	Rochow		2.16	2.5			
12	Giesenschlag North Mid South		1.69 1.36 1.90	2.3 2.3 2.3		2.8	5.7
13	Prebelow	7.5	1.55	3.0	1.4	58.3	5.2
14	Tietzow	8.0	2.21	2.5	1.4	44.6	3.1
15	Schlaborn	9.2	2.56	2.5	1.3	35.5	2.5
16	Rheinsberg	30.0	2.08	3.3	1.3	25.3	1.8
17	Grienerick	16.8	1.86	3.0	1.2	32.7	2.2
18	Linow	20.0	1.58	2.5		4.2	5.0
19	Schmidt		2.18	4.3			

¹ Geological Maps Scale 1 : 25,000 (1917); Sheets 51/26 & 52/27

³ Rated and Published in LUA 1996

² Calculated in GIS

⁴ Field Measurements in September 2–4, 1997

In Situ Field Spectrometry

Along with the in situ reference data, spectral reflectance measurements were taken using a portable spectrometer (FieldSpec FR, ASD Inc.) with an 8-degree fore-optic attachment. The spectra were recorded relative to a white reference panel (Spectralon) to obtain absolute reflectance values. The measurements were directed with the propagation of the sunlight to avoid sunglint and were taken about 50 cm above the water surface most possibly perpendicular to it. The data was resampled to the wavelength range between 400 nm and 850 nm in steps of 1 nm.

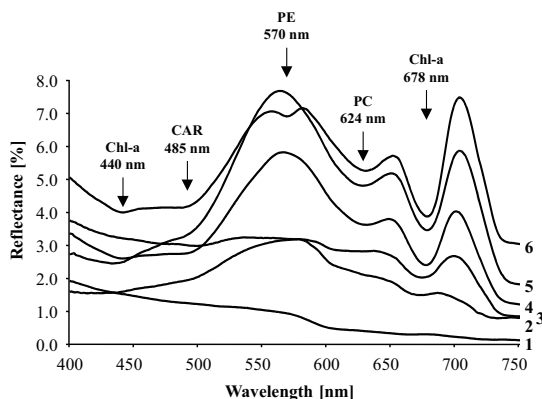
All measurements were conducted for the five lakes *Wumm*, *Zechlin*, *Schwarz*, *Bramin*, and *Kagar* (lakes 1–5 in Fig. 1). During the field work in early September, a total of 12 lakes were sampled by in situ reflectance spectrometry including the lakes labeled 1 to 5 and 13 to 17 in Fig. 1. For 15 lakes (including lakes 6, 8, 9, 12, and 18), additional reference information of Secchi disc depth and chlorophyll-a content was collected.

Fig. 2 shows reflectance spectra for different levels of chlorophyll-a concentration. The pure water of lake *Wumm* with negligible chlorophyll-a content shows the lowest reflectance and a continuous decrease of the signal towards longer wavelengths. At high concentrations of phytoplankton the spectra are characterised by chlorophyll-a

(Chl-a) absorptions at 435 nm and 678 nm, a distinct green peak due to biomass scattering in between these absorption bands, and a reflectance peak near 700 nm. The 700 nm peak is caused by increasing reflectance at the so-called red edge of plants and narrowed by the increasing absorption of water (RICHARDSON 1996, THIEMANN & KAUFMANN 1999). The algal pigment phyco-cyanin (PC) shows an absorption band at 624 nm in most of the reflectance spectra as well as carotenoids at 485 nm at the edge of the green reflectance maximum. At 570 nm the absorption of phycoerythrin (PE) becomes visible in the spectrum of lake *Bramin* taken in June.

Airborne Hyperspectral Data

The compact airborne spectrographic imager (casi) is mounted on a stabilised airborne platform. Its area array detects the incoming radiation between 400 nm and 900 nm in 512 spatial pixels. The user can choose between a spatial and a spectral mode. In the spectral mode all 288 spectral pixels are used resulting in spectral intervals of 1.8 nm. Due to the limiting read-out frequency there are only 39 so-called look-directions available in the spatial dimension. In this mode with high spectral resolution casi does not cover the ground continuously. In the spatial



1 Lake Wumm (Sept. 25, 1997): 2 µg/l	4 Lake Bramin (Sept. 25, 1997): 48 µg/l
2 Lake Schwarz (June 10, 1997): 11 µg/l	5 Lake Bramin (Sept. 2, 1997): 70 µg/l
3 Lake Kagar (June 10, 1997): 34 µg/l	6 Lake Bramin (June 10, 1997): 90 µg/l

Fig. 2: Reflectance spectra measured during field sampling with visible absorption bands (Chl-a: Chlorophyll-a, CAR: Carotenoids, PE: Phycoerythrin, PC: Phyco-cyanin) and according chlorophyll-a contents from in situ measurements.

mode full ground coverage is provided and up to 19 non-overlapping spectral bands in variable bandwidths can be defined by the user (itres, 1994). In this study the spatial mode was chosen with 17 bands covering the wavelength range between 430 nm and 716 nm continuously in different bandwidths (Fig. 3). Bands 18 and 19 were defined for later MOMS (Modular Optoelectronic Multispectral Stereo Scanner) simulation purposes. The narrow bands between 670 nm and 716 nm focus on chlorophyll-a absorption and the reflectance peak that is reported to shift due to variations in chlorophyll-a content (GITELSON 1992).

On September 1, 1997 the *casi* instrument, operated by the Institute for Space Sciences of the Free University of Berlin, was flown over the test site. Three flight lines taking in 25 lakes were recorded from an altitude of 2440 m above ground, resulting in a pixel size of about $3\text{ m} \times 3\text{ m}$. The data was calibrated to reflectance and atmospherically corrected using the ATCOR programme for hyperspectral airborne data (RICHTER 1996) and the empirical line method (CONEL et al. 1987) including field reflectance data. The data was geo-coded to a topographic map of the scale 1:25000. About 100 ground control points per flight line have been used. Data was resampled with the nearest neighbor method to preserve radiometry. Finally, a land mask was applied to the entire data set to focus on water bodies only and to avoid any spectral influence of surface floating vegetation.

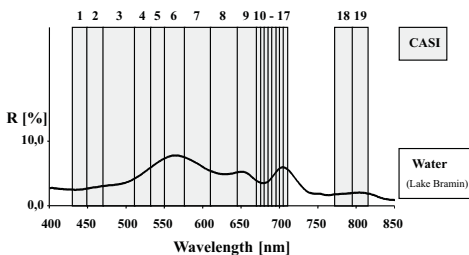


Fig. 3: Band settings of *casi* in comparison with a eutrophic water spectrum.

Analysis and Results

Secchi Disc Depth

For the determination of Secchi disc depth, the entire wavelength spectrum between 400 nm and 750 nm was used. Fig. 2 shows that the spectra vary in their overall reflectance. This can be due to wave action that can raise the signal by 10–20% (WETZEL 1983) or to slight variations in the detection angle during the measurements. To account for this and the optical influence of different concentrations of the water constituents present, a base line was fitted to each spectrum touching the two local minima at short visible wavelengths (mostly near 430 nm) and at longer VIS/NIR wavelengths (in most cases around 750 nm, in clear waters around 600 nm) to minimise and thus normalise the area between the base line and the spectrum. This area was calculated to get one mean value for each spectrum. The resulting value is called the spectral coefficient (SpCoef). In the special case of very clear water with continuously decreasing reflectance along with increasing wavelength, the baseline may cut the abscissa. From this intersection the abscissa was taken for the further area calculation to circumvent negative values.

Fig. 4 shows the regression between the spectral coefficient (SpCoef) and Secchi disc depth (SD) as measured with the Secchi disc.

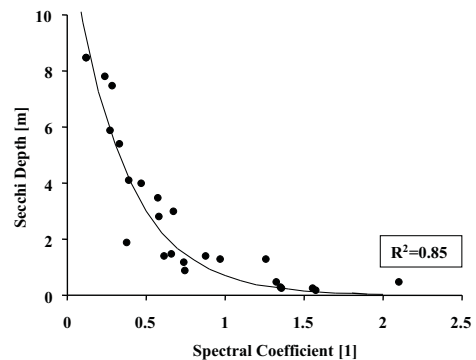


Fig. 4: Negative-exponential regression between spectral coefficient calculated from field spectra and Secchi depth as measured during field campaigns.

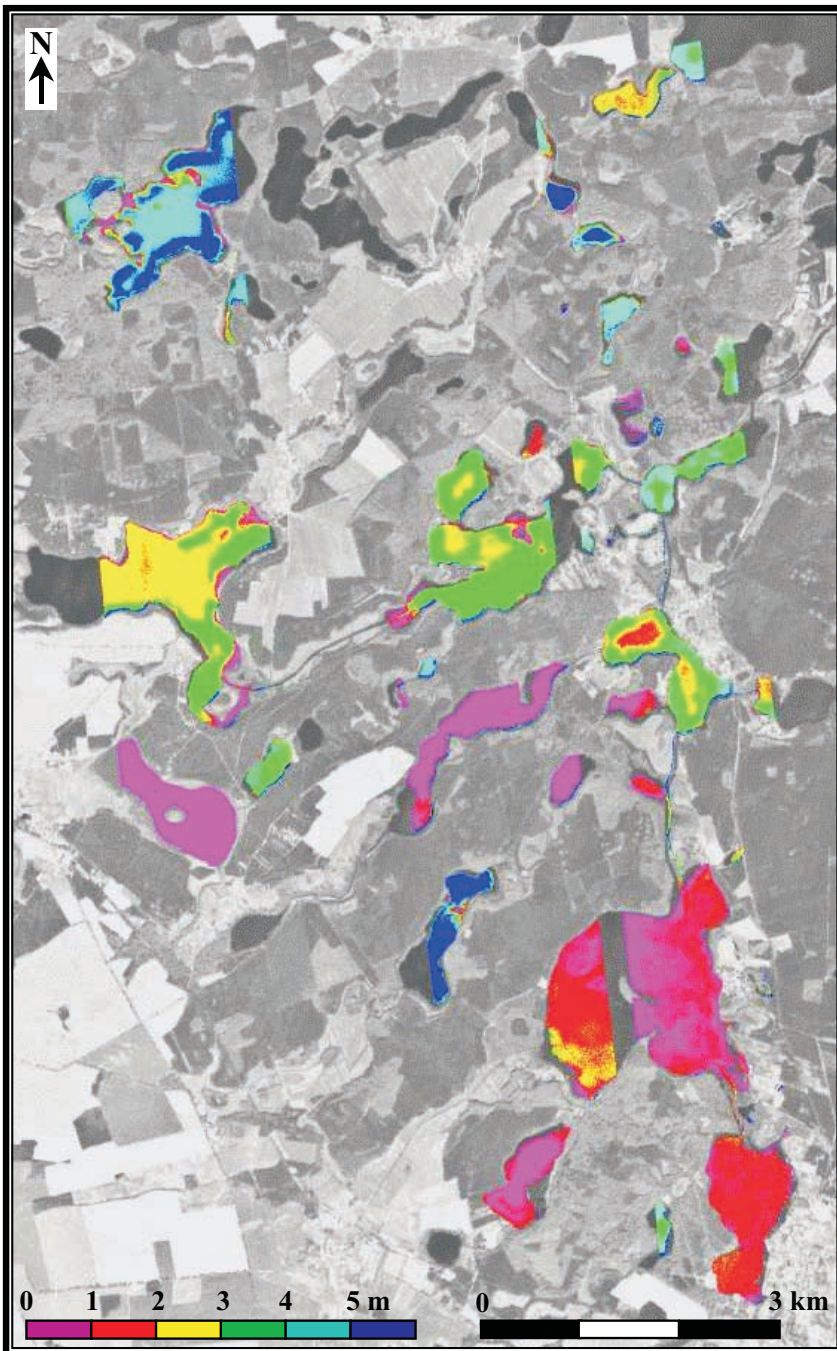


Fig. 5: Secchi depth as retrieved from the three casi flight lines by spectral coefficients and regression – panchromatic IRS-1C scene as underlay.

There is a high correlation with an $R^2 = 0.85$ described by the exponential regression Equation 1:

$$SD = 13.07 \cdot e^{-2.94 \cdot SpCoef} \quad (\text{Eq. 1})$$

Therefore, low spectral coefficients correspond to high Secchi disc depths, and high spectral coefficients can be assigned to low Secchi disc depths. The approach considers the spectral characteristics of all optical water constituents (phytopigments, suspended matter, humic substances): phytopigments as well as suspended matter especially increase the signal in between the two proposed local minima, the minimum in the blue would stay fixed and the one in the near infrared would only rise slightly with increasing content of water constituents. The area between the base line and the spectrum increases especially in the green wavelength region, and so will the area to be calculated resulting in a lower Secchi disc depth calculated from the negative exponential regression equation (Eq. 1). Increasing content of humic substances with increasing absorption in the blue wavelength range will reduce the first local minimum. With the base line fit to this lower first minimum the included area to be calculated will increase and therefore also the spectral coefficient. Different water types would only need a special adaptation of the regression parameters.

The mean standard error for this regression is 0.87 m for all recorded lakes. The more eutrophic lakes (e. g. lake *Bramin*) with low Secchi disc depths thus are provided with a higher percentage error than clear lakes.

This algorithm for the determination of Secchi disc depth from reflectance data was adapted to the 19 casi bands and implemented into the ENVI software (CREASO 1997) to be applied to spatial hyperspectral casi data. The R^2 is then reduced to 0.71 and the mean standard error is 1.26 m.

Fig. 5 presents the results for Secchi disc depth from the casi data sets. Secchi disc depth is subdivided into six classes from < 1 m to > 5 m. Lake *Bramin* (field measurement: 0.5 m) has always been underesti-

mated by far with about 0.03 m. Considering the mean standard error of 0.87 m, a division into classes of 1 m steps seems appropriate and results in the following classification of lakes. The lakes *Zechlin* (2.8 m), *Grienerick* (1.2 m), *Rheinsberg* (1.3 m), and *Schlaborn* (1.3 m) were very well estimated. Lake *Wumm*, even though partly in the greatest and most oligotrophic Secchi disc depth class, might be mainly underestimated. The measured Secchi disc depth at that date was 7.5 m; therefore a general decrease below a value of 5 m in the main basin is hard to assume. The areas in lake *Wumm* with calculated Secchi disc depths less than 4 m can be assigned to shallow water depths where the bottom limits the measurement of the Secchi disc depth.

Chlorophyll-a

Chlorophyll-a shows two diagnostic absorption bands at 435 nm and 678 nm. The reflectance peak around 700 nm is reported to correlate in its height with chlorophyll-a content (GITELSON 1992, GITELSON 1993, DEKKER 1993). A ratio between the reflectance peak and the red absorption has already been proposed by MITTENZWEY et al. (1988) and GITELSON (1992). DEKKER (1993) modified this ratio to 705 nm/675 nm. This relationship was applied here to derive chlorophyll-a content (CHL) from the in situ reflectance data (see Eq. 2). The wavelengths used correspond to the most frequent maximum and minimum within the measured field spectra.

$$CHL = -52.91 + 73.59 \cdot \text{Ratio} \quad (\text{Eq. 2})$$

[705 nm/678 nm]

Fig. 6 gives the linear relation of chlorophyll-a concentration to the ratio [705 nm/678 nm]. The additional influence of resuspended matter in the more turbid waters could therefore be excluded: the spectral ratio would have been reduced since suspended minerals increase the optical signal rather more in the chlorophyll-a absorption band at 678 nm than at the peak near 705 nm. Thus in the case of additional mi-

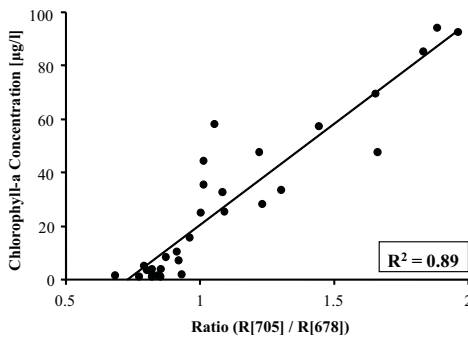


Fig. 6: Linear regression between spectral ratio calculated from field spectra and chlorophyll-a as analysed from field samples.

neral suspension, chlorophyll-a regression would not have been linear.

The mean standard error for predicted CHL is about 10 µg/l ($R^2 = 0.87$). Therefore, only low concentrations show a high percentage error and are often overestimated by this algorithm.

The algorithm was transferred to casi bands 16 (704 nm – 710 nm) and 11 (675 nm – 681 nm), thereby changing slightly the centre distance to – 54.94 and the gradient factor to 75.63. The R^2 decreases slightly to 0.86, and the mean standard error increases to 11.0 µg/l.

The lakes *Wumm*, *Zechlin*, and *Zootzen* show low chlorophyll-a contents as has also been verified during the field research (Fig. 7). Only lake *Wumm* exceeds the mean standard error significantly with derived 17 µg/l compared to 2 µg/l as measured. This fact may be explained by the used wavelength range for the reflectance ratio: at low chlorophyll concentrations the reflectance peak is shifted more towards shorter wavelengths and so the water absorption superimposes the reflectance peak. This makes the reflectance ratio less sensitive at low chlorophyll concentrations. Lake *Bramin* has the highest chlorophyll-a contents greater than 60 µg/l. Even though the lake is very shallow, a comparison between chlorophyll-a distribution and water depth showed no correlations. An interesting feature is the increasing chlorophyll-a content of the inter-

connected lakes *Tietzow*, *Schlaborn*, *Rheinsberg*, and *Grienerick* (lakes 14 to 17 – compare Fig. 1) along the direction of flow. Also the southern basin of lake *Tietzow* shows a mixture zone of the northern water body and the waters of lake *Zootzen* entering from the western canal.

Phycocyanin

Phycocyanin absorption was quantified using the absorption depth at 624 nm against a constructed continuum of the spectrum as it would be without the absorbing substance (CLARK & ROUSH 1984, DEKKER 1993). This continuum was assumed by the turning point within the flank of the green peak at 596 nm and by the maximum between the phycocyanin and chlorophyll-a absorption bands at 642 nm. These wavelength positions were determined by calculation of the first derivative as the most frequently occurring one for this purpose from the measured field spectra. The equation for the absorption depth of phycocyanin (D_{PC}) found here is similar to the one used by DEKKER (1993).

$$D_{PC} = \frac{R[596 \text{ nm}] + R[642 \text{ nm}]}{2} - R[624 \text{ nm}] \quad (\text{Eq. 3})$$

This algorithm was transferred to the casi data using bands 7 (575 nm to 610 nm), 9 (645 nm to 670 nm), and 8 (609 nm to 645 nm) (THIEMANN 2000). Since no in situ data for phycocyanin was available, phycocyanin could only be mapped qualitatively (Fig. 8a). Lakes with very little or no phycocyanin content coincide as expected with those showing low chlorophyll-a content. The highest content of phycocyanin can be found in lake *Bramin*, corresponding to the highest chlorophyll-a concentrations. Otherwise, lakes like lake *Schmidt* or lake *Dollgow* with high chlorophyll-a concentrations do not agree with higher phycocyanin contents.

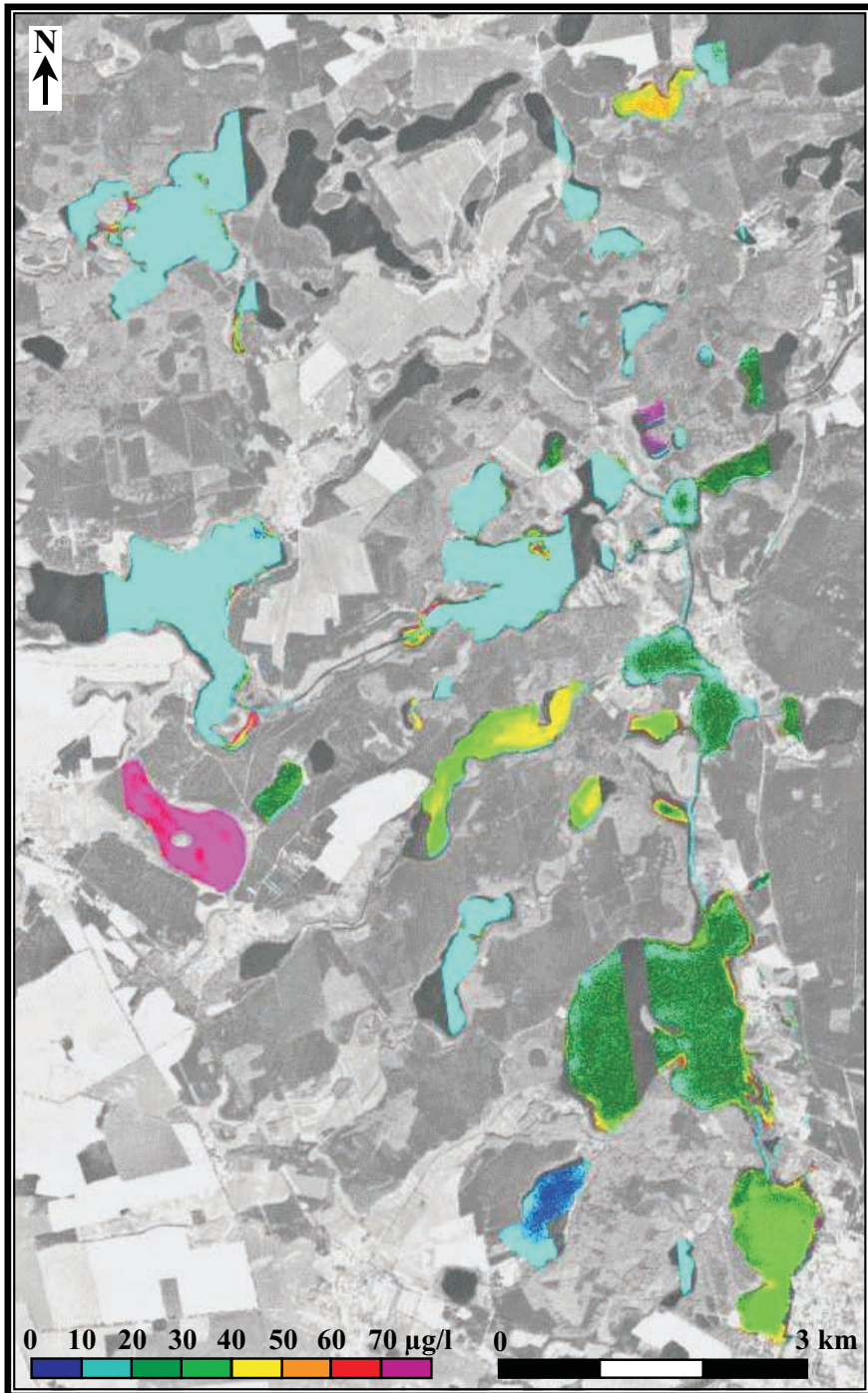


Fig. 7: Chlorophyll-a content as retrieved from the three casi flight lines by spectral rationing and regression – panchromatic IRS-1C scene as underlay.

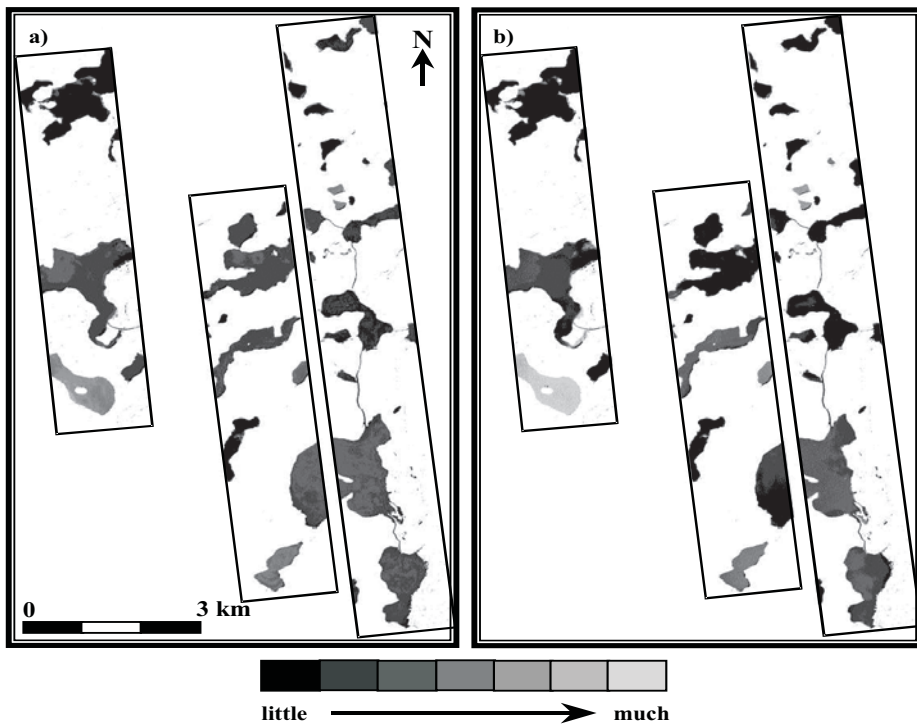


Fig. 8: Qualitative map a) of the phycocyanin content and b) of the carotenoid content as retrieved using absorption depth from the three CASI flight lines.

Carotenoids

Those carotenoids absorbing at 485 nm could be quantified using the absorption depth underneath the constructed continuum between the turning points at 467 nm and 526 nm. Since carotenoids absorb at different wavelengths in the shorter visible wavelength range, one should have in mind that this approach only records part of this group of phytopigments. The absorption depth for carotenoids (D_{CAR}) is calculated following Equation 4 (THIEMANN 2000):

$$D_{CAR} = \frac{R[467 \text{ nm}] + R[526 \text{ nm}]}{2} - R[485 \text{ nm}] \quad (\text{Eq. 4})$$

For mapping carotenoids qualitatively from

the CASI data, the algorithm was applied to bands 2 (449 nm to 469 nm), 4 (510 nm to 532 nm), and 3 (469 nm to 510 nm). The results for carotenoids displayed in Fig. 8b show a similar pattern as phycocyanin content with lowest contents in lakes *Wumm*, *Zechlin*, *Giesenschlag*, *Schmidt*, *Zootzen*, and *Pätsch*. The contents in lake *Bramin* seem to be higher than the ones for phycocyanin in relation to the other lakes. In lake *Zechlin* similar patterns for carotenoids and phycocyanin are visible, but differ from the chlorophyll-a distribution (Fig. 7). Further, different patterns appear in lakes *Zootzen*, *Schlaborn*, *Rheinsberg*, and *Grienerick* when comparing Figs. 8a and b. This is an indicator that different algal species occur within the test area.

Interpretation Regarding Trophic State

Trophic State Index after CARLSON

The trophic state index (TSI) for lakes (CARLSON 1977) yields continuous values scaled between 0 and 100 based either on Secchi disc depth, chlorophyll-a concentration, or total phosphorus content. A TSI between 40 and 50 can be assigned to mesotrophic state, whereas values of more than 80 correspond to hypertrophic conditions. The TSI permits the comparison of the trophic state of lakes where only one or another parameter was measured. The trophic state index TSI using Secchi disc depth (TSI_{SD}) is calculated following Equation 5. A Secchi disc depth of 2 m results in a TSI_{SD} of 50. The TSI using chlorophyll-a concentrations (TSI_{CHL}) includes a regression between Secchi disc depth and chlorophyll-a content where numerous midlatitude lakes were considered (see Eq. 6). To get a TSI_{CHL} of 50 a chlorophyll-a content of $7.25 \mu\text{g/l}$ is assumed.

$$TSI_{SD} = 10 \cdot \left(6 - \frac{\ln[SD]}{\ln 2} \right) \quad (\text{Eq. 5})$$

$$TSI_{SD} = 10 \cdot \left(6 - \frac{2.04 - 0.68 \ln[\text{Chl} - a]}{\ln 2} \right) \quad (\text{Eq. 6})$$

Both Secchi disc depth and chlorophyll-a, as quantified from the airborne hyperspectral data, were used as inputs for the TSI. Regarding Secchi disc depth the trophic state index could be well determined for mesotrophic lakes. The eutrophic lake *Bramin* was overestimated with this method. However, a eutrophic lake could be classified very well by the estimations based on chlorophyll-a, whereas the more clear lakes are then overestimated. This can be explained by the mean errors which have a much higher percentage on low values resulting from Equations 1 and 2. TSI_{SD} is more sensitive at low Secchi disc depths, while TSI_{CHL} is more sensitive at low chlorophyll-a contents. In this case, high values of Secchi

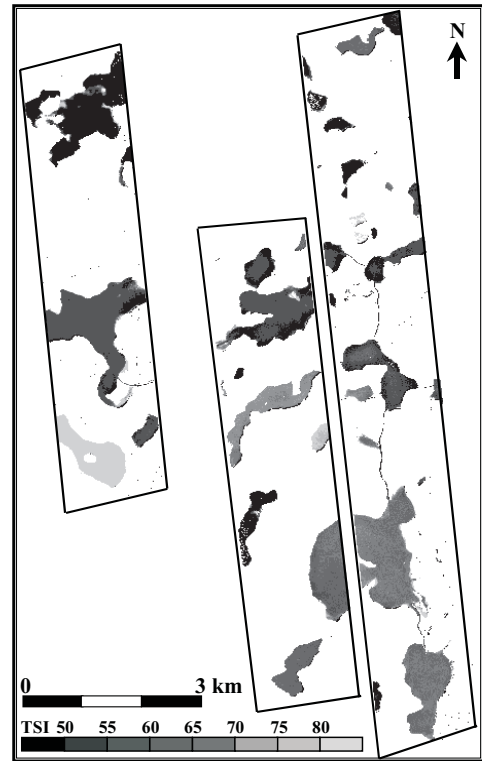


Fig. 9: Trophic State Index after CARLSON (1977) as mean after Secchi depth (TSI_{SD}) and chlorophyll-a (TSI_{CHL}).

disc depth corresponding to low nutrient lakes show the best results in trophic classification using the TSI. Both methods are complementary in their accuracy (THIEMANN & KAUFMANN 1998). Therefore, the TSI-results calculated from Secchi disc depth and chlorophyll-a have been averaged to take account for the complementary accuracies within oligo- and eutrophic waters. Thus, a more detailed discrimination of trophic state has been achieved (Fig. 9). In contrast to the maps of chlorophyll-a (Fig. 7) and Secchi disc depth (Fig. 5), respectively, lake *Wumm* is distinguishable from lake *Zechlin* and lake *Dollgow* from lake *Bramin*. The phenomenon of decreasing water quality along the river *Rhin* is also visible in the merge of TSI_{SD} and TSI_{CHL} . Lake *Bramin* is classified as highly eutrophic corresponding to its state of infilling.

Quality Classes after KLAPPER

The determination of quality classes after KLAPPER (1992) is based on 17 different criteria divided into oxygene rate, nutrient rate, and production rate. Of these 17 criteria, chlorophyll-a content and Secchi disc depth are considered to be of major importance since they are the easiest to determine in practice. Tab. 2 shows how chlorophyll-a content and Secchi disc depth are assigned to the quality classes. The approach after

Klapper was also used by the Institute for applied Fresh Water Ecology to rate the Brandenburg lakes, so the remote sensing results (Fig. 10) could be compared to the existing data (see Tab. 1). The lakes *Pätsch* and *Giesenschlag* and partly lake *Wumm* have been rated as mesotrophic (THIEMANN 2000). Most of the lakes like *Zechlin*, *Zootzen*, and *Prebelow* through *Grienerick* have been ranked in the eutrophic class, and lakes *Bramin* and *Dollgow* can be found in the polytrophic class. Only lake *Schmidt* reaches hypertrophic state using this database. Therefore, the ranking does not exactly fit the one in Tab. 1 since there were only two parameters and one date to be included instead of a mean over the entire bioproduktive phase. However, even though the classes are spread over a larger scale, the internal ranking with lowest and highest trophic state is preserved.

Both models for determination of trophic state generally show the same tendency with the lowest ranking for lakes *Wumm*, *Giesenschlag*, and *Pätsch*, and with highest for lakes *Bramin*, *Dollgow*, and *Schmidt*. Both lakes *Bramin* and *Dollgow* are rated in much higher classes using the remote sensing analysis than when using in situ measurements. Therefore, it should be clarified in further multi-temporal evaluations whether this is due to a unique seasonal incident or due to long-term changes in water quality.

Conclusion

This study presents methods and results for the analysis of water constituents using hyperspectral field and airborne data. The point measurements of the high spectral resolution field spectrometer were used to set up the algorithms for a hyperspectral ana-

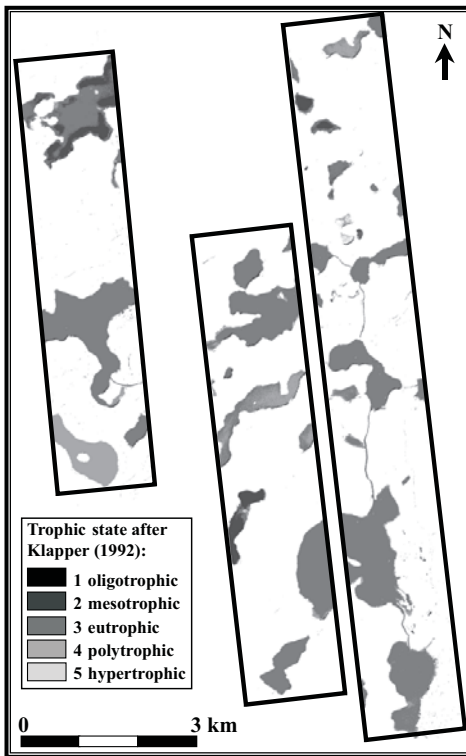


Fig. 10: Trophic state after KLAPPER (1992) as mean from Secchi depth and chlorophyll-a.

Tab. 2: Quality classes after KLAPPER (1992).

Criteria	1 oligotrophic	2 mesotrophic	3 eutrophic	4 polytrophic	5 hypertrophic
Chlorophyll-a [$\mu\text{g/l}$] (mean April–September)	≤ 3	≤ 10	10–40	40–60	> 60
Secchi depth [m]	≥ 6	≥ 4	≥ 1	≥ 0.5	< 0.5

lysis and were also used for atmospheric correction of the *casi* as ground reference.

The airborne hyperspectral *casi* data provides information on Secchi disc depth and chlorophyll-*a*, and thus on trophic state. The Secchi disc depth and chlorophyll-*a* content figures calculated from the *casi* data have almost the same correlation coefficients and mean standard errors as the field data, but offer the great advantage of a simultaneous spatial overview of numerous lakes. The further potential of hyperspectral data to quantify humic substances is under investigation. As for the phytopigments, carotenoids and phycocyanin, approaches for their quantification using their absorption bands have been developed and applied to the *casi* data. The results remain qualitative because of the lack of reference data. However, they already give a differentiated spatial overview. In the same way the quantification of phycoerythrin using the absorption at 570 nm (see Fig. 2) also seems to be possible if present in the waters.

The resulting algorithms may be transferred to other lake systems in Northern Germany. By the application of models for trophic state it could be shown that mapping of trophic state is possible using remote sensing data. It is an advantageous tool to support the more intensive in situ measurements more effective over space and time.

Acknowledgements

The Institute for applied Fresh Water Ecology in Brandenburg supported us greatly with their equipment, human power, and laboratory analyses.

We thank Prof. Dr. ANATOLY GITELSON at J. Blaustein Institute for Desert Research, Israel, for his valuable discussions and the encouragement to monitor selected lakes throughout one bio-productive season.

References

- ARP, W., 1997: Der Große Wummsee. Seenberichte: Straussee, Twernsee, Giesenschlagsee, Wittensee und Großer Wummsee. – Institut für angewandte Gewässerökologie in Brandenburg GmbH, ed., Studien und Arbeitsberichte, Potsdam, 169–216.
- CARLSON, R.E., 1977: A Trophic State Index for lakes. – *Limnology and Oceanography*, **22**: 361–369.
- CLARK, R.N. & ROUSH, T.L., 1984: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications. – *Journal of Geophysical Research*, **89 B 7**: 6329–6340.
- CONEL, J.E., GREEN, R.O., VANE, G., BRUEGGE, D.J., ALLEY, R.E. & CURTISS, B.J., 1987: AIS-2 radiometry and a comparison of methods for the recovery of ground reflectance. – *Proceedings of the 3rd AIS Data Analysis Workshop*, JPL, 18–48.
- CREASO, 1997: The Environment of Visualizing Images (ENVI) – Version 2.6.
- DEKKER, A.G., 1993: Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing. – *Dissertation Vrije Universiteit, Amsterdam*, 222 p.
- DIN 38 412 – Part 16, 1986: Testverfahren mit Wasserorganismen (Gruppe L) – Bestimmung des Chlorophyll-*a*-Gehaltes von Oberflächenwasser.
- GITELSON, A., 1992: The peak near 700 nm on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration. – *International Journal of Remote Sensing*, **13**: 3367–3373.
- GITELSON, A., 1993: Algorithms for remote sensing of phytoplankton pigments in inland waters. – *Advances in Space Research*, **13**: 197–201.
- GUNKEL, G. (ed.), 1994: Bioindikation in aquatischen Ökosystemen. – *Gustav Fischer Verlag, Jena*, 540 p.
- HÄKANSON, L., 1995: Models to predict secchi depth in small glacial lakes. – *Aquatic Sciences*, **57**: 31–53.
- ITRES, 1994: Compact Airborne Spectrographic Imager (*casi*). – *itres Instruments Inc.*
- KLAPPER, H., 1992: Eutrophierung und Gewässerschutz. – *Gustav Fischer Verlag, Jena*, 277 p.
- KRAUSCH, H. & ZÜHLKE, D. (eds.), 1974: Das Rheinsberg-Fürstenberger Seengebiet. – *Werte unserer Heimat*, **25**, Akademie der Wissenschaften der DDR, Akademie-Verlag, Berlin, 247 p.
- MITTENZWEY, K.-H., GITELSON, A., LOPATCHENKO, A.A., SUKHORUKOV, B.L. & VOIGT, T., 1988: In-situ monitoring of water quality on the basis of spectral reflectance. – *International Revue ges. Hydrobiology*, **73**: 61–72.
- RICHARDSON, L.L., 1996: Remote sensing of algal bloom dynamics. – *BioScience*, **46**: 492–501.

- RICHTER, R., 1996: Atmospheric correction of DAIS hyperspectral image data. – *Computers & Geosciences*, **22**: 785–793.
- SCHWOERBEL, J., 1993: Einführung in die Limnologie. – UTB Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 284–288.
- SCHWOERBEL, J., 1994: Methoden der Hydrobiologie. Süßwasserbiologie. – UTB Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 14–18.
- STACKEBRANDT, W., EHMKE, G. & MANHENKE, V. (eds.), 1997: Atlas zur Geologie von Brandenburg im Maßstab 1:1 000 000. – Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg, Kleinmachnow, 26–31.
- THIEMANN, S., 2000: Erfassung von Wasserinhaltsstoffen und Ableitung der Trophiestufen nordbrandenburgischer Seen mit Hilfe von Fernerkundung. – Dissertation, Scientific Technical Report STR00/04, GFZ Potsdam, 115 p.
- THIEMANN, S. & KAUFMANN, H., 1998: Secchi disc depth and chlorophyll-a determination using field spectrometer and airborne hyperspectral data in the Mecklenburg Lake District, Germany. – *Proceedings of the 27th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Tromsø, Norway, 8–12 June, 324–328.
- THIEMANN, S. & KAUFMANN, H., 1999: The origin of the reflectance peak near 700 nm in chlorophyll-a laden waters – an experiment. – *Proceedings of the IGARSS'99*, Hamburg, Germany, June 28 – July 2, 1999, published on CD-ROM.
- VOLLENWEIDER, R.A., 1989: Global problems of eutrophication and its control. – *Symposia Biologica Hungarica*, **38**: 19–41.
- WETZEL, R.G., 1983: *Limnology*. – Saunders College Publishing, Philadelphia, 766 p.
- Anschriften der Autoren:
 Dr. rer. nat. SABINE THIEMANN, DLR Oberpfaffenhofen, Institut für Methodik der Fernerkundung, Gewässerfernerkundung, Postfach 1116, D-82230 Weßling, Tel.: +49-8153-282841, Fax: +49-8153-281444, e-mail: sabine.thiemann@dlr.de
 Prof. Dr. FRIEDRICH WIENEKE, Ludwig-Maximilians-Universität München, Institut für Geographie, Luisenstr. 37, D-80333 München, e-mail: f.wieneke@iggf.geo.uni-muenchen.de
 Prof. Dr. HERMANN KAUFMANN, GeoForschungs-Zentrum Potsdam (GFZ), Projektbereich Fernerkundung, Telegrafenberg, 14 473 Potsdam, e-mail: charly@gfz-potsdam.de
- Manuskript eingereicht: November 2000
 Angenommen: Dezember 2000

Die Erfassung der schlaginternen Verteilung der frischen Biomasse von Wintergerste mittels Radarfernerkundung

STEFAN HAWLITSCHKA, MARIA HAMACHER & WALTER KÜHBAUCH, Bonn

Zusammenfassung: Mit Hilfe von hochauflösenden Radarfernerkundungsdaten wird eine Karte der lokalen Verteilung der Biomasse erstellt. Dabei wird die Korrelation der Radarrückstreuung in der Kombination von L-Band hh und X-Band vv mit der Biomasse von Wintergetreide ausgenutzt. Da Radar nicht auf die Biomasse selbst, sondern auf Leitfähigkeit und Geometrie des Targets reagiert, müssen die störenden durch die Bearbeitungsrichtung hervorgerufenen Streifen, die durch das Foreshortening vergrößerten Hochspannungsmasten und nicht bewirtschaftete, teilweise mit Wasser gefüllte Senken ausmaskiert werden. Diese Bildregionen machen sich mit einer vom Getreide verschiedenen Rückstreuintensität und Textur bemerkbar und konnten automatisch detektiert werden. Der bei einer pixelweisen Umrechnung von Radarrückstreuquerschnitten in Biomasse störende Speckleeffekt wurde mit einem selbstentwickelten Filterverfahren eliminiert.

Summary: *Mapping the distribution of the fresh biomass of winter barley fields by means of radar remote sensing.* A map of the distribution of the fresh biomass within winter barley fields is derived from high resolution radar remote sensing data. A good correlation of the biomass of winter barley with a combination of the backscatter intensities of L-band hh and X-band vv data is found. Because radar does not react directly on the biomass but on the conductivity and geometry of a target some typical effects had to be removed from the data, such as bright stripes showing the row direction, by foreshortening enlarged pylons and not cultivated areas within the fields. These effects are detected by means of different radar backscatter intensities and texture and could be detected automatically. Speckle was eliminated by filtering.

1 Landwirtschaftliche Anwendungen der Radarfernerkundung

Die Radarfernerkundung bietet für die Landwirtschaft Anwendungspotentiale bei (1) der Fruchtartenklassifizierung und (2) der Zustandsbeschreibung von Feldfrüchten.

Da die Helligkeitsvariationen in Radarbildern aufgrund des Speckleeffekts größer sind als die Dynamik zwischen Feldern verschiedener Fruchtarten oder gar Variationen des Radarrückstreuquerschnitts innerhalb von Ackerschlägen, ist eine pixelweise Auswertung der Intensitäten von ungefilterten Bildern ungeeignet. Unter der Voraussetzung, dass die Feldgrenzen bekannt sind, kann der Speckle umgangen werden, indem die mittlere Rückstreuintensität der Felder

zur Klassifikation verwendet wird. Vorausgesetzt wird, dass die Feldgrenzen erst durch Segmentierung der Radardaten bzw. zusätzlicher optischer hochauflösender Fernerkundungsdaten oder durch Feldbegehung mit GPS bestimmt wurden.

Für die Zustandsbeschreibung einzelner Ackerschläge insbesondere der kleinräumigen Variation werden höhere räumliche Auflösungen benötigt, die zur Zeit mit keinen operationellen Systemen zur Verfügung stehen. Für die teilchlagspezifische Bewirtschaftung der Ackerflächen („Precision Farming“, Präzisionspflanzenbau) könnte jedoch die hochauflösende Fernerkundung wertvolle Informationen für ortsgenaue pflanzenbauliche Maßnahmen liefern. Als ein Beispiel soll hier die Anfertigung von Karten der Verteilung vitaler Biomasse in-

nerhalb von Ackerschlägen frühzeitig in der Vegetationsperiode angeführt werden. Damit können mit eindeutigem Ortsbezug Unregelmäßigkeiten innerhalb der Ackerschläge festgestellt werden. Auf diese Weise kann der Landwirt gegebenenfalls mit ortsge-nauen Maßnahmen reagieren, sei es mit Düngung oder mit Pflanzenschutzmaßnahmen.

Bereits heute stehen vielen Landwirten Teilschlaginformationen über die Bodenverhältnisse, die Nährstoffversorgung und das Unkrautauflkommen sowie GIS zur Verfügung. Die aktuelle Ertragsbildung und Vitalität der betreffenden Ackerkulturen folgt einer jahresabhängigen Varianz, die für pflanzenbauliche Maßnahmen aktuell während des Wachstums erfasst werden muss. Dafür bietet Radar hervorragende Möglichkeiten, weil wetterunabhängig der Zustand der Pflanzendecke bereits frühzeitig und über weite Strecken des Wachstums erfasst werden kann. Zu beachten ist jedoch stets, dass das vom Radar gezeichnete Erscheinungsbild keine ursächlichen Informationen enthält und daher mit zusätzlichen Informationsebenen sowie dem Fachwissen und der Beobachtung des Landwirtes verknüpft werden muss. Sind z. B. im Radarbild Vitalitätsverluste zu beobachten, die tatsächlich durch Nährstoffmangel verursacht wurden, könnte anhand dieser Information und mit Anbindung des Düngegerätes an GPS eine ortsbezogene Nachdüngung der Bestände erfolgen.

2 Die Messung von Biomasse mittels Radar

In Zusammenarbeit mit der Firma *Dornier Satellitensysteme GmbH (DSS)* und dem *Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)* wurde mit einem flugzeuggetragenen SAR-Sensor an Wintergersteflächen die schlaginterne Variation der Biomasse mit Ortsbezug, d. h. in einem gebräuchlichen Koordinatensystem festgestellt. Die Versuchsflächen lagen in Mecklenburg-Vorpommern auf dem Betrieb der Neetzower Agrarhof Peenetal GmbH. Verwaltung und Aufbereitung der ortsbezogenen Daten er-

folgte in einem Geographischen Informationssystem (GIS). Das Projekt diente als Vorbereitungsstudie für die Konfiguration des geplanten Erdbeobachtungssatelliten TerraSAR; sie wurde mit dem E-SAR des DLR in der Konfiguration L-Band vollpolarimetrisch sowie Xhh und Xvv vom DLR am 15.4.1999 durchgeführt. Die Daten wurden als SLC und „multilook detected“ sowie geokodiert ausgeliefert. Die Biomasseschätzung erfolgte mit Multilook-Daten mit ca. 2 m Auflösung. Es wurde angenommen, dass die Geokodierung die Statistik der Daten nicht wesentlich verfälscht und eine Filterung nicht beeinträchtigt.

Für die Untersuchungen standen in der Vegetationsperiode 1999 drei aneinandergrenzende Wintergersteflächen zur Verfügung. Die Flächen zeigten bereits in den Vorjahren inhomogenen Bewuchs. Aus drei optischen Landsat-Szenen der vergangenen Jahre wurden 16 Teilflächen innerhalb der drei Schläge bestimmt, die in sich homogene Rückstreuereigenschaften in allen Datensätzen zeigten, untereinander jedoch unterschiedliches Rückstreuverhalten aufwiesen. Annähernd zeitgleich zur Überfliegung (+/- 1 Std.) wurden in der Mitte dieser Teilflächen in einem 20 m Raster Pflanzen- und Bodenproben (jeweils an vier Stellen) entnommen. Bestimmt wurde die frische und die trockene Biomasse sowie die Bodenfeuchte der oberen 4 cm. Die Auswertung dieser „ground truth“-Daten zeigte, dass die Biomasse innerhalb der vier Messstellen von 14 der 16 Teilflächen eine geringe Varianz aufwies, also jeweils ein homogener Bewuchs vorlag. Eine der Messflächen zeigte in den Radardaten inhomogenes Rückstreuverhalten. Diese Fläche sowie die zwei Teilflächen mit inhomogenem Bewuchs wurden aus der weiteren Untersuchung ausgeschlossen. In den verbleibenden 13 Messflächen wurden die Bodendaten mit den Radardaten korreliert.

Die Bodenerhebungen wurden folgendermaßen durchgeführt: An den Eckpunkten eines Quadrates mit 20 m Kantenlänge wurde jeweils eine Pflanzen- und eine Bodenprobe genommen. Für die Biomasseerhebung wurden Stichproben erstellt, indem je-

weils von 0,5 m Metern einer Getreidereihe der oberirdische Aufwuchs geerntet wurde. Von der Lufa (Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt) in Rostock wurde mit dem Pflanzenmaterial die feuchte und nach Trocknung bis zur Gewichtskonstanz die trockene Biomasse pro m^2 ermittelt. Zur Bestimmung der Bodenfeuchte wurde die Stechzylindermethode angewandt, die nach unseren Erfahrungen die robustesten Ergebnisse liefert. Der Stechzylinder wird mit den Händen oder vorsichtig mit dem Fuß bündig in den Boden gedrückt und dann mit einer kleinen Schaufel aus dem Boden entfernt. Am unteren Rand wird überstehendes Bodenmaterial entfernt und der Inhalt des Zylinders in einen Plastikbeutel entleert. Die prozentuale Bodenfeuchtigkeit wurde durch Trocknung der Bodenproben an der Lufa Rostock ermittelt.

Bezüglich der Reaktion von Radarwellen mit den Getreidepflanzen ist von folgender Vorstellung auszugehen: Vertikal polarisierte Mikrowellen können mit den weitgehend senkrechten Pflanzenteilen von Getreide (Stängel) sehr gut interagieren, während horizontal polarisierte Wellen weitgehend unbeeinflusst bleiben und tiefer in den Bestand eindringen. Es zeigt sich bei der vertikalen Polarisation eine Absorptionsdämpfung an den Stängeln, die mit zunehmender Biomasse stärker wird. Das zeigt sich z. B. beim C-Band des ERS (HAMACHER et al. 2000) und auch bei Scatterometermessungen im X- und C-Band (GNOSA 1997). FERRAZOLLI & GUERRIERO (1994) fanden unter Verwendung des L- und des P-Bandes, dass bei offenem Boden $\sigma_{vv} > \sigma_{hh}$, bei Pflanzenbeständen jedoch umgekehrt $\sigma_{vv} < \sigma_{hh}$ gilt. Dies wurde von STEINGESSER & KÜHBAUCH (1998) ausgenutzt, um mit dem Parameter Lhh/Lvv die Biomasse von Mais und Wintergerste abzuschätzen.

Dieser Ansatz wurde in den vorliegenden Untersuchungen ebenfalls angewendet. Allerdings zeigte sich hier, dass nicht Lhh/Lvv sondern Lhh/Xvv die höchsten Korrelationen zur Pflanzenbiomasse bot. Dies ist in der ersten Grafik von Abb. 1 dargestellt. Hier wurde im logarithmischen Maßstab der kalibrierten dB-Werte Lhh-Xvv [dB] als

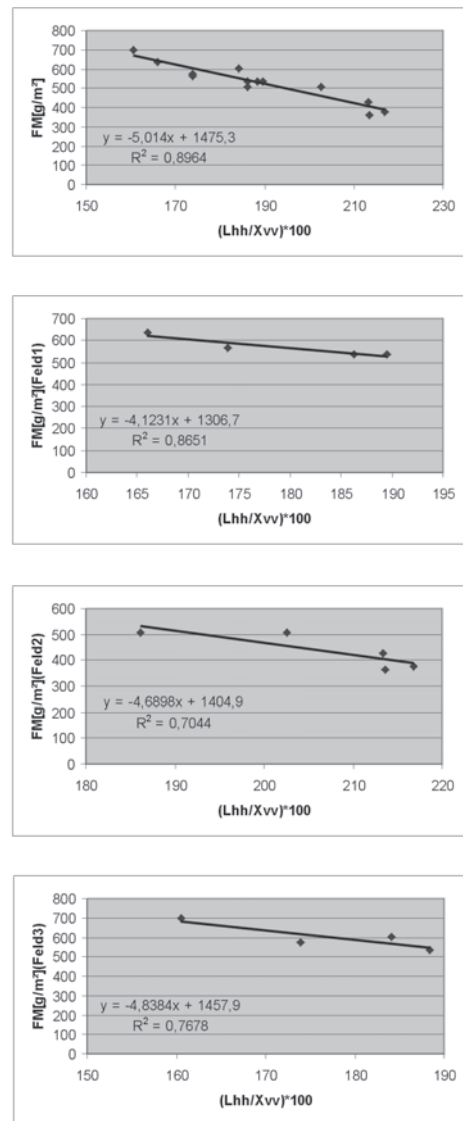


Abb. 1: Korrelation der frischen Biomasse (FM) mit dem Koeffizienten Lhh/Xvv aus den Daten aller Felder und der einzelnen Felder.

Schätzer mit der höchsten Genauigkeit gefunden. Beim Vergleich der gemessenen Biomassewerte fällt auf, dass STEINGESSER & KÜHBAUCH (1998) im Bereich ab 700 g/m^2 gemessen haben, im vorliegenden Projekt jedoch die frische Biomasse zwischen 350 und 700 g/m^2 lag. Dies erklärt die stärkere Sen-

sivität des kürzeren X-Bandes auf die Biomasse; wengleich im X-Band die polarimetrische Information nicht so stark ausgeprägt ist, wie im L-Band. Aus diesem Grund konnte mit $X_{hh}-X_{vv}$ [dB] keine brauchbare Korrelation gefunden werden.

3 Die Biomassekarte von Wintergersteslägen

Um den oben beschriebenen Zusammenhang zwischen Radarrückstreuung und Biomasse möglichst automatisch in eine Biomassekarte einzubringen, ist noch ein erheblicher Aufwand hinsichtlich der Datenverarbeitung notwendig. Als erstes fällt in den originalen Radardaten der vorherrschende Speckleeffekt (Abb. 2) auf.

Der Speckle würde sich bei einer Umrechnung der Radarintensitätsdaten in einer Biomassekarte ebenfalls zeigen. Es wurde daher ein Filter entwickelt, um den Speckleeffekt zu eliminieren, d.h. den körnigen Aspekt des Speckles zu unterdrücken ohne die radiometrischen Eigenschaften der Signatur wesentlich zu verändern (Abb. 3). Ebenso ist zu erkennen, daß die Intensitätssprünge an Kanten nicht aufgeweitet werden. Somit scheint eine direkte Umrechnung in Biomassewerte möglich, wenn es gelingt, unerwünschte radartypische Effekte, nämlich die teilweise helle Erscheinung der Reihenrichtung, die durch das Foreshortening hervorgerufene vergrößerte Darstellung der Hochspannungsmasten und die nicht bewirtschafteten Areale (Wasserlöcher) zu detektieren und auszumaskieren.

3.1 Das angewendete Filterverfahren

Bei dem Filter handelt es sich um ein adaptives modellbasiertes Verfahren. Das mittelnde Filter arbeitet fensterbasiert und adaptiv, beginnend mit kleinen bis hin zu großen Fenstergrößen. Aufbauend auf dem etablierten multiplikativen Specklemodell, das eine Gamma-Verteilung der Intensitäten für homogene Flächen, bzw. physikalisch ausgedrückt, für ein ausgedehntes Target mit konstantem Radarrückquerschnitt annimmt, wird als Strukturdetektion jeweils

die Abweichung von einer Gamma-Verteilung als Maß für die Stärke einer innerhalb des Fensters vorhandenen Textur verwendet. Als Textur wird hier nur die räumliche Variation des Radarrückstreuquerschnitts angesehen, nicht die durch den Speckleeffekt hervorgerufenen körnige Struktur der Radarbilder.

Das Filter besteht aus zwei ähnlich arbeitenden Stufen: (1) Es wird über die unterschiedlichen Radarbänder und -polarisationen gemittelt. Die Kanäle werden in solcher Weise miteinander kombiniert, dass aus n Eingangskanälen n Ausgangskanäle berechnet werden. Im Gegensatz zu einer simplen Addition von Kanälen werden die Daten derart aufsummiert, dass die Unterschiede in Textur und Intensität in den einzelnen Bildern erhalten bleiben. Gleichartige Texturen in verschiedenen Kanälen werden gegenüber dem Speckle verstärkt. Dies wird erreicht, indem für jeden Kanal die mittlere Intensität innerhalb der jeweiligen Fenstergröße berechnet wird und als mittlere Intensität des Targets angenommen wird. Dann wird die Stärke der Textur bestimmt und das Verhältnis der Stärke der Texturen zweier Kanäle als Wichtungsfaktor genutzt, mit dem jeweils der eine Kanal zur Glättung des anderen verwendet wird. Für eine optimale Specklereduzierung ist es notwendig, dass die mittleren Intensitäten des Targets in beiden Kanälen gleich sind, bzw. vor der Addition angeglichen werden, da die Stärke des Specklerauschens proportional zur Intensität des Targets ist. Addiert wird daher die Intensität des zentralen Pixels (des jeweiligen Fensters) von Kanal 2 zur Intensität von Kanal 1. Dadurch werden gleich starke und gleichhelle Specklemuster gegeneinander gemittelt. Dabei wird eine Wichtung entsprechend der Ähnlichkeit der Texturen vorgenommen. Zusätzlich wird die Mittelung bei Überschreitung eines Schwellwertes ganz unterbunden, wenn die Texturen zu verschieden sind. Dies wird mit immer größer werdenden Fenstern wiederholt, also rekursiv durchgeführt; die Stärke des Speckleeffekts macht eine wiederholte Glättung notwendig. Durch die Wichtungsfaktoren werden die Fenstergrößen, bei denen die



Abb. 2: Ungefilterte L-Band Daten als Dreifarbenkomposit.



Abb. 3: Gefilterte und kalibrierte L-Band Daten als Dreifarbenkomposit.

größte Übereinstimmung in der Textur vorliegt, am stärksten gewichtet (adaptive Filtertechnik). (2) Die Einzelbilder werden unter Anwendung der gleichen Prinzipien gefiltert. Im Fall (1) werden bei ähnlichen Texturen in zwei Bildern die Bilder gegeneinander gemittelt, wohingegen im Fall (2) der

Einzelkanal jeweils mit dem Mittelwert des betrachteten Fensters gemittelt wird, wenn innerhalb des Fensters keine oder nur schwache Texturen vorliegen. Dies wird auch wieder adaptiv über die verschiedenen Fenstergrößen wiederholt und nur dann durchgeführt, wenn ein gewisser, aufgrund

der statistischen Fehler von der Fenstergröße abhängiger Schwellwert nicht überschritten wird. Damit bietet das Filter zwei Möglichkeiten, die Bildqualität zu beeinflussen, je nachdem, ob eine starke Glättung oder eine detailgetreue Erhaltung feiner Strukturen gewünscht wird. Die Schwellenwerte können herauf- oder herabgesetzt und der Bereich der Fenstergrößen verändert werden. Die E-SAR Bilder wurden mit Fenstergrößen von 3×3 bis 19×19 bearbeitet.

3.2 Die Maskenerstellung

Die Erstellung einer Maske um den Effekt der hellen Streifen entlang der Bearbeitungsrichtung gestaltete sich unerwartet schwierig. Da dieser Effekt theoretisch von einer Zweifachstreuung („Double Bounce“, Streuung an Pflanze und Boden) in den Fahrspuren verursacht sein kann, wurde untersucht, ob er sich in der polarimetrischen Phase niederschlägt. Ein entsprechender Effekt trat nur sehr schwach auf, und ließ sich nicht ausnutzen. Diese Streifen zeichnen sich durch Textur und durch höhere Rückstreuintensität aus. Das Filter wurde deshalb in der Weise verfeinert, dass die Streifen als Binärbild dargestellt wurden. Die Detektion dieser Gebiete wurde für jedes Radar-

band und jede Polarisation einzeln durchgeführt und die Einzelmasken dann summiert. Diese Summation erfolgt derart, dass nur dann, wenn in einem Fenster von 3×3 Pixeln in allen verfügbaren Kanälen des L- und X-Bandes zusammen mindestens 5 mal Heterogenität detektiert worden war, das zentrale Pixel des betrachteten Fensters im Summenbild den Wert 1 erhielt. Dadurch wurde eine nahezu rauschfreie Maske erstellt. Dabei wurden nicht nur die Reihen detektiert, sondern auch die Hochspannungsmasten und nicht bewirtschaftete Senken innerhalb der Felder, in denen teilweise Büsche und Bäume wachsen und aufgrund der vorhergehenden starken Regenfälle teilweise Wasser stand. Mit dieser Maske (Abb. 4) besteht jetzt die Möglichkeit einer großflächigen, weitgehend störungsfreien Untersuchung des Biomasseaufkommens aus Radarbildern ohne störende Nebeneffekte.

3.3 Weitere Bildverarbeitungsschritte

Für die Erstellung der Biomassekarte wurden folgende weitere Schritte weitgehend mit Hilfe von Standardroutinen der Fernerkundungssoftware „EASI/PACE“ durchgeführt:

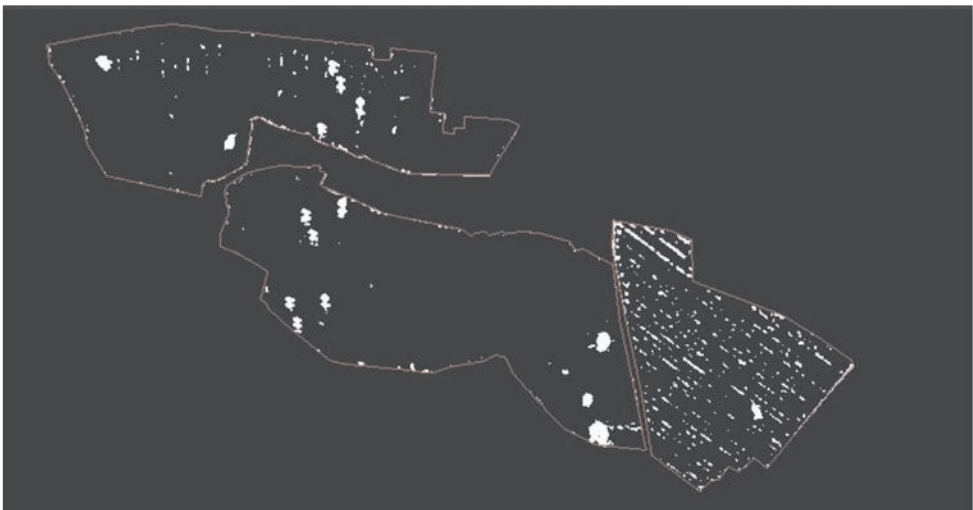


Abb. 4: Maske der Heterogenitäten.



Abb. 5: Biomasse auf den Testflächen (Legende siehe Abb. 6).

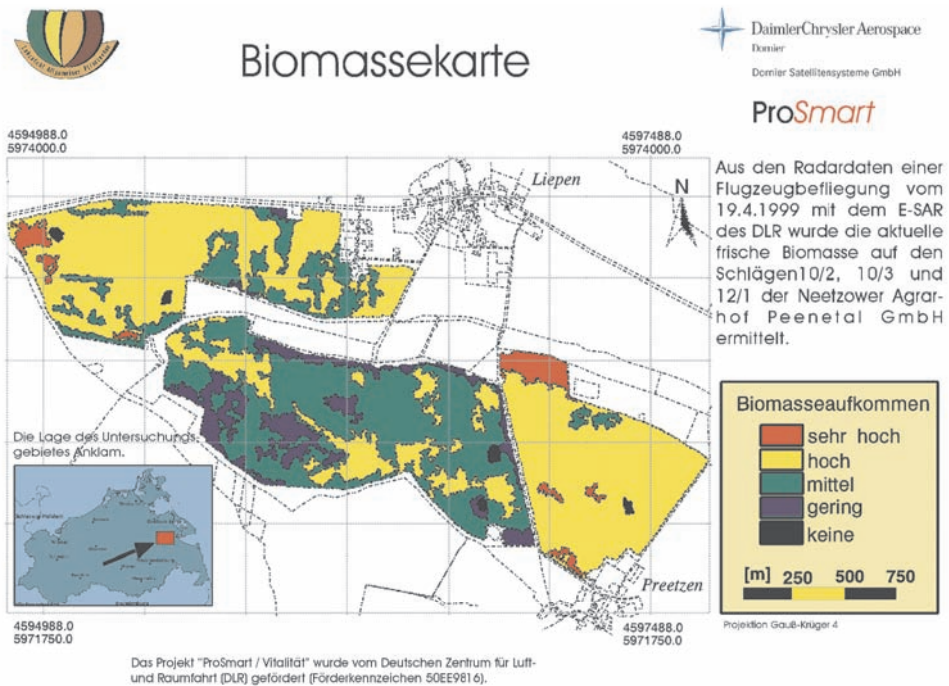


Abb. 6: Karte der Verteilung der Biomasse aus dem L-Band hh und X-Band vv generiert.

- Mit Hilfe des modifizierten Filters wurde eine Reihen- und Inhomogenitätsmaske als Binärbild erstellt.
Die Maske wurde mit Hilfe des EASI/PACE-Programmes CONTOUR vektorisiert.
- Die Radarbänder wurden überall dort mit dem EASI/PACE Programm FGA (Gauß-Filter $\sigma = 32$) nachgefiltert, wo die Maske ungleich 0 war.
- Die Umgebung der Wintergerstefelder wurde ausmaskiert.
- Die Hochspannungsmasten wurden aus der vektorisierten Reihen- und Inhomogenitätsmaske selektiert und in eine Bildebene eingebrannt.
- Im Bereich der Hochspannungsmasten wurde mit Hilfe des MODELERS in „ImageWorks“ der Grauwert auf einen bestimmten, nicht im Bild vorkommenden Wert, gesetzt.
- Daraufhin konnte mit dem EASI/PACE Programm GRDINT im Bereich der Hochspannungsmasten eine Interpolation der Grauwerte durchgeführt werden.
- Für eine Glättung der Kanten und Grenzl意思 wurde der EASI/PACE Mode Filter FMO mit einer Fenstergröße von 7×7 Pixel angewendet.
- Nach Sichtung der Biomasseverteilung im bisher noch sehr fein aufgelösten Bild wurde zur Filterung der zu kleinräumigen Biomasseinformationen ein Sieve Filter zum Zweck des Polygon Merge (Verschmelzung benachbarter Polygone) eingesetzt: Allen Polygonen $< 2.000 \text{ m}^2$ wurde der Biomassewert des größten Nachbarpolygons zugeordnet.
- Optische Aufbereitung mit Pseudocolour.
- Import in ARC/Info.
- Georeferenzierung und weitere optische Aufbereitung des Bildes zu Präsentationszwecken.

Das Ergebnis ist für die Testflächen in Abb. 5 und generalisiert für die drei Felder in Abb. 6 zu sehen. Die Einteilung in 5 Klassen entsprach den Forderungen des Landwirtes.

4 Danksagung

Die Studie wurde vom DLR (Förderkennzeichen 50EE9816) und Dornier Satellitensysteme GmbH (heute Astrium Space) gefördert. Die Autoren danken der Firma Dornier Satellitensysteme GmbH für die Bereitstellung der Befliegungs- und Bodendaten.

5 Literatur

- FERRAZOLLI, P. & GUERRIERO, L., 1994: Interpretation and model analysis of Maestro I Flevo-land data. – *International Journal of Remote Sensing*, **15**.
- GNOSA, T., 1997: Radarfernerkundung landwirtschaftlich genutzter Flächen- Scatterometermessungen an Winterweizen und Zuckerrüben. – Diss. Univ. Bonn, unveröff.
- STEINGIESSER, R. & KÜHBAUCH, W., 1998: Erfassung der frischen und trockenen Biomasse und Schätzung der frischen Biomasse von Wintergerste in verschiedenen Regionen Europas mit einem raumgleitergetragenen Radarsensor. – *Journal of Agronomy & Crop Science*, **181**: 145–152.
- HAMACHER, M., RADEMACHER, I. F., HAWLITSCHKA, S. & KÜHBAUCH, W., 2000: Erkennung landwirtschaftlicher Nutzpflanzenbestände mittels multitemporaler ERS-1/-2 Radaraufnahmen. – *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation* **2001** (2): 119–127.

Anschriften der Verfasser:

Dipl.-Phys. STEFAN HAWLITSCHKA, FGAN Forschungsgesellschaft für Angewandte Naturwissenschaften e.V., Neuenahrer Strasse 20, D-53343 Wachtberg, Tel.: 0228-9435 865, Fax: 0228-856 277, e-mail: stefan@hawlitschka.de

Dipl.-Ing. agr. MARIA HAMACHER, Lehrstuhl für Allgemeinen Pflanzenbau, Universität Bonn, Katzenburgweg 5, D-53115 Bonn, e-mail: m.hamacher@freenet.de oder hamacher@lwk-rheinland.nrw.de

Prof. Dr. WALTER KÜHBAUCH, Lehrstuhl für Allgemeinen Pflanzenbau, Universität Bonn, Katzenburgweg 5, D-53115 Bonn, Tel.: 0228-73-2041, Fax: 0228-73-2871, e-mail: lap@uni-bonn.de

Manuskript eingereicht: November 2000

Angenommen: Dezember 2000

Operational Texture Algorithms for Oil Spill Detection from RADARSAT Data

MAGED MARGHANY, Kuala Terengganu, Malaysia

Abstract: This paper presents work done to utilize texture algorithms in oil spill detection. Detection of oil spill from RADARSAT image using texture statistics derived from the conditional joint probability density functions of the grey level co-occurrence matrix. Texture algorithms are implemented to RADARSAT image without performing any type of filter. Texture algorithms are applied with window size of 7×7 .

This study shows that, out put results are varied between a different algorithms. Contrast created a poorly image structure for oil spill detection. The entropy, energy and homogeneity perform good detection of oil spill compared to correlation and contrast algorithms. The combination of entropy, energy and homogeneity provided good improvement for oil spill detection. It can be concluded that texture algorithms such as entropy, energy and homogeneity could be used as automatic tool for oil spill detection.

Zusammenfassung: Nutzung von Textur-Algorithmen für die Erkennung von Ölverschmutzungen mittels RADARSAT-Daten. Diese Veröffentlichung präsentiert die Ergebnisse einer Forschungsarbeit über die Nutzung von Textur-Algorithmen für die Erkennung von Ölverschmutzungen. Die Erkennung von Ölverschmutzungen in Radarsat-Bildern mit Hilfe von Textur-Statistiken wurde von bedingten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen, basierend auf einer Grauwert co-occurrence Matrix, abgeleitet. Die Textur-Algorithmen wurden ohne vorherige Filtervorgänge auf Radarbilder angewendet. Sie wurden mit Fenstergrößen von 7×7 eingesetzt.

Diese Studie zeigt, dass die Ergebnisse von verschiedenen Algorithmen unterschiedlich sind. Kontrast schafft minderwertige Bildstrukturen für Ölverschmutzungserkennungen. Entropie, Energie und Homogenität eignen sich sehr gut für diese Anwendung, verglichen mit Korrelation oder Kontrastalgorithmen. Eine Kombination von Entropie, Energie und Homogenität stellte eine Verbesserung für die Ölverschmutzungserkennung dar. Als Schlussfolgerung kann man sagen, dass Textur-Algorithmen wie Entropie, Energie und Homogenität als automatisierte Methode für die Erkennung von Ölverschmutzungen genutzt werden können.

Introduction

Synthetic aperture radar (SAR) images exhibit many interesting peculiarities, such as independence of meteorological conditions and possibility of evaluating dielectric and geometric properties of surface. Nevertheless, they are characterized by considerable speckle noise, which causes a granular aspect, even in homogenous areas. According to ULABY et al. (1986) different kinds of image objects can be investigated by using sta-

tistical classification approach. The statistical classification approach is represented in texture analysis. Texture analysis play vital role in radar data processing. According to LARRY et al. (1979) texture feature can be crucial for the segmentation of an image and can serve as the basis for classifying image parts. The radar image contains microtextures and macrotextures. Microtextures are represented only several pixels, while macrotextures are represented large pixel areas. The discrimination between both textures is

function of spatial statistical variation. The spatial statistical variation will be function of pixel intensity. This approach has been documented by HARALICK et al. (1973). They proposed the spatial co-occurrence procedure in the derivation of textural features which characterize spatial variability in digital imagery. They assumed that the texture information on an image is contained the overall or average spatial relationship which the gray tones in the image have to one another. Those relationships are computed for four directions between neighboring image pixels within a specified window on the image.

SAR image intensity is created by point measurements of the backscattering coefficient. Backscattering coefficient is function of size interrelationships between the radar wavelength and the scattering points within a single pixel footprint. The image intensity described by variation of backscattering coefficient. Backscattering variation in radar image will create random variability in grey level over the spatial resolution. According to DAVID & LEDREW (1991) texture refers to spatial variation of backscattering.

Oil dampens the small waves (on the order of 3 cm) that provide radar reflection from the ocean surface. This causes dark blotches on the radar image compared to the surrounding pixels characteristics (WAHL 1993, WESITEEN et al. 1993, MICHAEL et al. 1997). According to ANNE et al. (1991) and BEENELLI & GARZELLI (1999) the presence of oil on water causes clutter suppression over the area of the spill, resulting in attenuation of the Bragg scale waves and reduced signal return to the sensor. On the image an oil spill will have a darker tone than the surrounding water. Wind shadows near land, regions of low wind speed, natural surfactants and grease ice can be mistaken for oil spills and ancillary or multi-temporal information is needed to discriminate the oil spill from other phenomena (HOVLAND et al. 1994).

It may be the variation of the gray level with oil spill pixels can be discriminated easily by applying texture analysis. The most commonly oil spill detection algorithms are based image classification such

as maximum likelihood and fuzzy classification techniques (ANNE et al. 1999 and MOHD et al. 1999). These algorithms operate on per pixel basis only without taking into account the surrounding pixels. Texture analysis detect the gray level variation per pixels which are related to neighboring pixels. This will be useful to discriminate between oil spill areas from surrounding sea water. This because of the different texture features in image represented by a set of statistics for the occurrences of each grey level at different pixels and along different direction (HARALICK 1979).

This study will focus on the following two approaches: (i) that texture analysis can be discriminated oil spill area from the surrounding area. Texture analysis could be used to map the location of oil spill on the coastal water; and (ii) that the integration between texture analysis could be used as automatic tool for oil spill detection.

The main objective of this study is to examine texture analysis model in detection of oil spill. Several texture algorithms will be used to identify the suitable texture model for oil spill detection.

Methodology

RADARSAT Image

The RADARSAT data were acquired at 26 October 1997. This RADARSAT fine mode with Cvv band which covered the Malacca Straits between 102°16' E to 103°48' E and

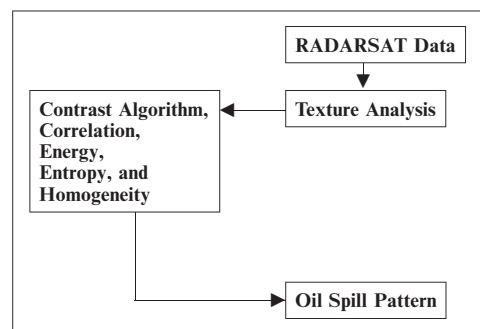


Fig. 1: Flowchart of Texture Algorithms for Oil Spill Detection.

1°16'N to 2°13'N. The processing of the RADARSAT fine mode image is shown in Fig. 1.

According to MOHD et al. (1999) oil spills occurred on 26 October 1997 due to collision between two ships, i.e. MT Orapin Global and MV Evoikos in Singapore. MOHD et al. (1999) reported that this collision caused 25000 tones of crude oil to be spilled into the sea.

Oil Spill Detection by Textures Analysis

The main content of the present module is based on the co-occurrence matrices as one of the best approaches to texture analysis. The coherent nature of SAR can be determined from the variation of image intensity from pixel to pixel. This can be described by the fading statistics and can be represented as a fading random variable. The spatial variation in image intensity of every pixel that constitutes a target gives rise to intrinsic scene texture. This texture can be described in texture random variable. The texture methods are represented in the first order statistics of the fading and the texture random variables described their probability density functions (pdf). The second order fading and texture statistics describe the relationships between a pixel and its neighbors (ULABY et al. 1986).

The measurement of textures is based on HARALICK's (1979) method, which emphasized the use of statistics derived from a co-occurrence matrix. The aim of this method is to characterize the stochastic properties of the spatial distribution of gray level in an image. Furthermore, the co-occurrence matrix depends not only on the spatial relationships of gray level but also on regional intensity background variation within the image. Texture analysis can be based on criteria derived from these co-occurrence matrices. These criteria are energy, contrast, and correlation. Energy is an angular second moment i.e. an image homogenates which measure the more homogenous in image, contrast is a measure of local image variation and correlation is a measure of

image linearity; linear directional structures result in large correlation values in this direction (MILAN et al. 1993).

Texture analysis was calculated a specified texture measure for each pixel using gray level co-occurrence matrices. The output image might be used as one of several input features to the classification process. Texture analysis was done which no pre-filtering performed since these filtering programs average out a lot of the textural character of the image (HARALICK 1979).

The texture of an image is related to texture statistics such as homogeneity, contrast, and entropy. These different statistics of texture are selected in order to get more feature information. The texture analysis depends on window size. In this study the window, size was 7×7 pixels and lines. According to HARALICK (1979), SOREN & CURTIS (1996) the window size of 7×7 gives more details on an image. As the window, size is used for producing the co-occurrence matrix for each input pixel. Spatial parameter is specified the relationship for a pixel to its neighbor to define the direction and distance for texture analysis. The spatial relationship is considered for pixel and its neighbor. In this study, 0 and 1 selected the spatial that mean the texture algorithm considered the relationship between each pixel and one below it.

Texture features were computed by the following equations.

(i) Contrast:

$$\text{Con} = \sum_i \sum_j (i - j)^2 p_{ij} \quad (1)$$

(ii) Entropy:

$$\text{Ent} = \sum_i \sum_j p_{ij} \log p_{ij} \quad (2)$$

(iii) Energy:

$$\text{Eng} = \sum_i \sum_j (p_{ij})^2 \quad (3)$$

(iv) Homogeneity:

$$\text{Hom} = \sum_i \sum_j p_{ij} / \{1 + (i - j)\}^2 \quad (4)$$

(v) Correlation:

$$Cor = \left\{ \sum_i \sum_j (ij) p_{ij} - \mu_x \mu_y \right\} \quad (5)$$

where i and j are the pixels and lines in SAR image and P_{ij} is the marginal probability of gray-level co-occurrence matrix in the direction of the pixels and lines are the means and standard deviations of marginal probability through pixels and lines (ARAI 1991).

Result and Discussion

Fig. 2 shows that the raw data of RADARSAT with heavy oil pollution which represented with dark spots. These dark spots cover area with approximately 300 km along the coastal waters of Malacca Straits. Fig. 2b shows that the results of the RADARSAT image of texture analysis after averaging filter had performed. It is obvious that the output image was lost its spatial information. According to MAGED et al. (1996) the filters average out a lot of texture in an image. The out put result was destructive image (Fig. 2b).

Fig. 3 shows the texture analysis results without employing any filter. Fig. 3 shows the result of contrast texture analysis. It is obvious that the large area of oil spill is detected compared to smallest area. This result

is poor compared to the raw data. The dark spots of oil spills are obvious clearly in raw data compared to contrast result. According to CONNERS & HARLOW (1980) contrast measures the amount of local variation in the image. It is high when the local region has a high contrast in the scale of spatial. It is obvious that contrast is function with large size of oil spill (Fig. 3). This is because of the fact that contrast reflects both the coarseness of the texture and the contrast of edge. This explains why large size of oil

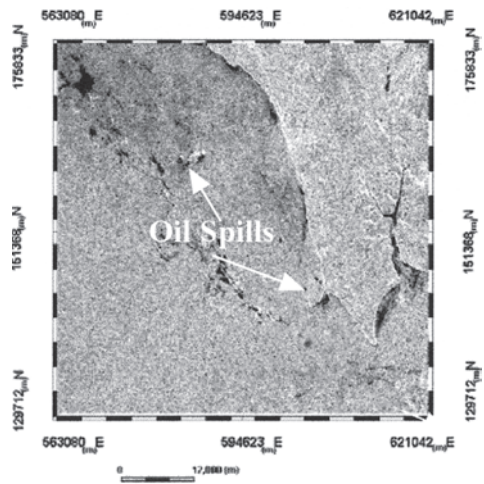


Fig. 3: Result of Contrast Analysis.

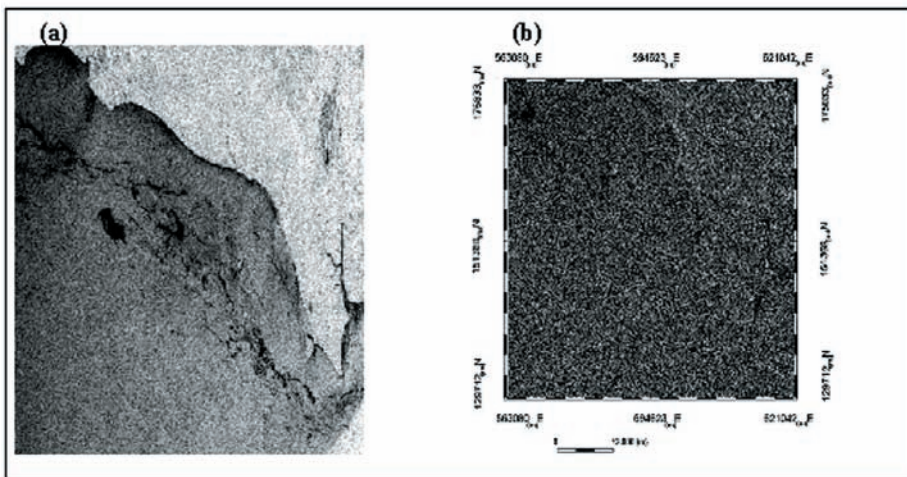


Fig. 2: (a) RADARSAT Raw Data and (b) Average Filter before Texture Analysis.

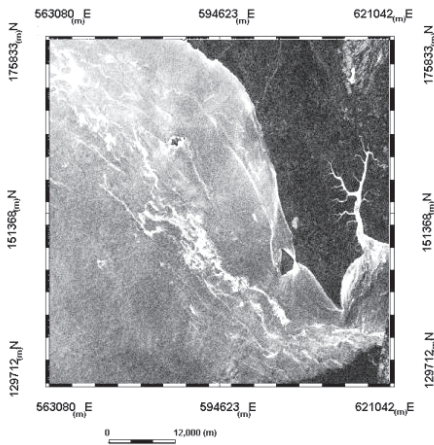


Fig. 4: Result of Correlation Analysis.

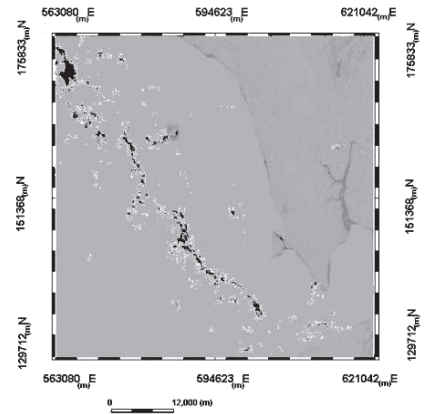


Fig. 6: Result of Energy Analysis.

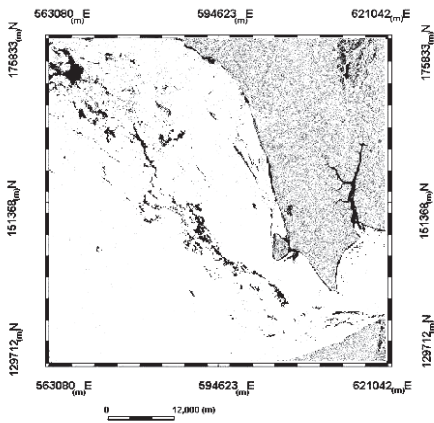


Fig. 5: Result of Entropy Analysis.

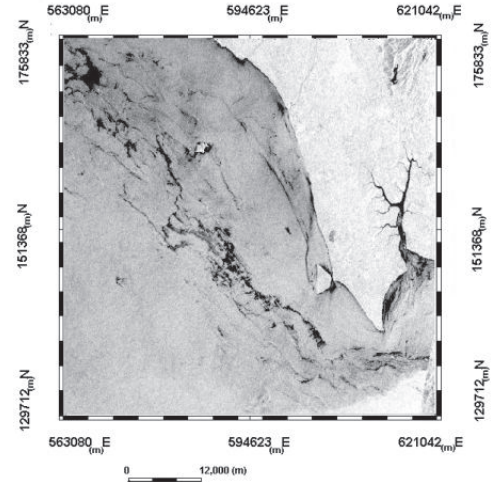


Fig. 7: Result of Homogeneity Analysis.

spills are detected in contrast image with sharp shoreline edge.

It is obvious that the correlation image signed the area of dark spots with bright signatures (Fig. 4). This is because of the fact that correlation measures the linear dependency of gray levels of neighbouring pixels. According to HARALICK (1979) when the scale of local texture is much larger than the distance of spatial, correlation is typically high. When the local texture has a scale similar

to or smaller than spatial, there will be low correlation between pairs of pixels.

It is obvious that entropy, energy and homogeneity can distinguish between oil spill areas surrounding area compared to contrast and correlation (Figs. 5, 6 and 7). This is because of the fact that energy is measured the non-uniformity in the image. This could be used to distinguish between low back-scattered value of oil spills and surrounding pixels area. Entropy used to separate be-

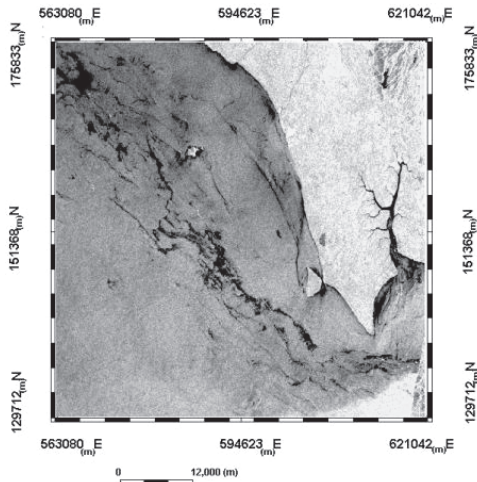


Fig. 8: Combination of Entropy, Energy and Homogeneity Algorithms.

tween oil spills layers and water and land. This could be attributed to that entropy is a measure of uniformity in the image.

In general, the entropy provided a grater improvement than correlation and contrast. The integration between entropy, homogeneity and energy provided a grater improvement than either the entropy or energy separately. The greatest improvement was achieved with the combination of the three algorithms (Fig. 8).

Fig. 9 shows that the percentage of oil spill detection is increased with combination of entropy, energy, homogeneity. This is be-

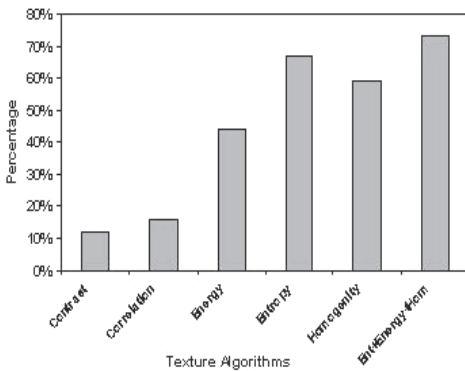


Fig. 9: Percentage Accuracy of Texture Algorithms for Oil Spill Detection.

cause of the fact that energy is a measure of homogeneity. In relatively low gray level on oil spill areas, there will be low backscatter changes and hence, there will be large entries in the matrix off the diagonal. The energy value will be closed to its minimum in oil spill areas.

Entropy is a measure of variability or randomness because the concentration of backscatter changes in relatively few locations would be nonrandom essentially, the entropy measure will be low. It notice that these features measure the same characteristic texture and they are interpreted differently. Entropy measures the absolute variability in backscatter change over the selected window.

Conclusions

It can be concluded that texture algorithms such as entropy, homogeneity, energy are good for automatic detection of oil spill. It is preferred to work with texture algorithms prior to any filtering operation. The integration between the entropy, homogeneity and energy provided a greatest improvement for oil spill detection. The contrast and correlation algorithms are not suitable for oil spill detection. Both algorithms can be work with large or surrounding oil spill area.

References

ANNE, H., SOLBERG, S., GEIR, S., RUNE, S. & VOLDEN, E., 1999: Automative Detection of Oil Spills in ERS SAR Images. – IEEE Transactions on Geo. & Remote Sen. **37** (4): 1916–1924.

ARAI, K., 1991: GCP Acquisition Using Simulated SAR and Evaluation of GCP Matching Accuracy with texture Features. – Int. J. Remote Sensing. **12** (11): 2389–2397.

BENELLI, G. & GARZELLI, A., 1999: Oil-spills Detection in SAR Images by Fractal Dimension Estimation. – Proceedings of IGARSS'99, 28 June–2 July, Homburg, Germany. Vol II, pp: 1123–1126.

CONNERS, R. W. & HARLOW, C. A., 1980: A Theoretical Comparison of Texture Algorithms. – IEEE Tr. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol PAMI-2, No. 3, May 1980.

- DAVID, G. B. & LE DREW, E. F., 1991: SAR Sea Ice Discrimination Using Texture Statistics: A Multivariate Approach. – *J. Photo. Eng. and Remote Sen.* **57** (4): 385–395.
- HARALICK, R. M., SHANUNUGAN, K. & DINSTEN, I. 1973: Texture features for Image Classification. – *I.E.E.E. Transactions on Systems, man and cybernetics*, SMC-3, 610–621.
- HARALICK, R. 1979: Statistical and Structural Approaches to Texture. – *Proceedings of the IEEE*, **67** (5): 786–804.
- HOVLAND, H. A., JOHANNESSEN, J. A. & DIGRANES, G., 1994: Slick Detection in SAR Images. – *Proceedings of IGRASS 94*, Pasadena, CA., August 8–12, 1994, pp: 2038–2040.
- LARRY, S. D., JOHNS, S. A., & AGGARWAL, J. K., 1979: Texture analysis Using Generalized Co-Occurrence Matrices. – *IEEE Transactions on Geo. & Remote Sen.* PAMI-1 (3): 2501–2579.
- MAGED, M. M., MANSOR, S. & IBRAHIM, Z. Z., 1996: On the Application of Radarsoft to Extract Infrastructure Details from RADARSAT. – *Proceeding of Malaysian Remote Sensing Society Conference on Remote Sensing and GIS*. Crown Prince Hotel, Kuala Lumpur, Malaysia, 25–27 November 1996.
- MAGED, M., 2000: Finite Element Simulation of Tidal Current Movements on Malacca Straits. – *Proceeding of IGARSS'2000*. Honolulu, Hawaii 24–28 July 2000. Vol. II. pp: 2966–2968.
- MICHAEL, D. H., OLSEN, R. B., HOYT, P. & VACHON, P., 1997: The Ocean Monitoring Workstation Experience Gained with RADARSAT. – *Paper Presented in Geomatics in the ERS of RADARSAT'97 Conference*. Ottawa, Canada, 25–30 May 1997.
- MOHD, I. S., SALLEH, A. M. & TZE, L. C., 1999: Detection of Oil Spills In Malaysian Waters from RADARSAT Synthetic Aperture Radar Data and Prediction of Oil Spill Movement. – *Proceeding of 19th Asian Conference 23–27 November 1999*. Hong Kong. Vol **2**: 980–987.
- MILAN, S., VACHAV, H. & ROGER, B., 1993: Image Processing Analysis and Machine Vision. – New York: Chapman and Hall Computing.
- SOREN, R. & CURTIS, W., 1996: Combining Spectral and Texture Data in the Segmentation of Remotely Sensed Images. – *J. Photo. Eng. and Remote Sen.* **62** (2): 181–194.
- ULABY, F. T., KOUYATE, F. BRISCO, B. & WILLIAMS, T. H. L., 1986: Textural Information in SAR Images. – *IEEE Transactions on Geo. & Remote Sen.* **24** (2): 233–245.
- WAHL, T., 1993: Oil Spill detection Using satellite based SAR, phase 1b Completion Report. – *Tech. Rep., Norwegian Defence Res.*
- WESTEEN, K., SOLBERG, A., & SOLBERG, R., 1993: Detection of Oil Spills in SAR Images using A Statistical Classification. – *Proceedings of IGRASS 93*, Tokyo, August 8–12, pp: 943–945.

Address of the author:

Dr. MAGED MARGHANY
 Faculty of Science and Technology
 Department of Marine Science
 College University Science and Technology
 21030 Kuala Terengganu, Malaysia
 e-mail: magedupm@hotmail.com

Manuskript eingegangen: Februar 2001

Angenommen: April 2001

Modellierung systematischer Fehler von abtastenden Laseraltimetern

TONI SCHENK und BEÁTA CSATHÓ, Columbus, OH, USA

Zusammenfassung: Genauigkeitsuntersuchungen von Punkten, die mittels Laseraltimetrie vom Flugzeug aus bestimmt wurden, lassen darauf schließen, dass selbst nach in situ Kalibrierung erhebliche systematische Fehler verbleiben. Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der Modellierung systematischer Fehler. Dabei wird von den physikalischen Fehlerursachen ausgegangen. Nach der Modellierung der einzelnen Systemdefekte wird deren Auswirkung unter verschiedenen Aufnahmebedingungen untersucht. Die einzelnen Fehlervektoren ändern sich in Größe und Orientierung von Punkt zu Punkt; die Simulationen zeigen ein sehr heterogenes Fehlerbild. Ohne Fehlermodell ist es deshalb kaum möglich, aus den in den Daten an einzelnen Stellen (z. B. Streifenüberlappung) festgestellten Diskrepanzen allgemeingültige Regeln zur Fehlerbeseitigung abzuleiten. Der Beitrag befasst sich auch mit der Bestimmbarkeit der Fehler. Die gewonnenen Erkenntnisse führen zu verbesserten Kalibrations-Strategien.

Summary: *Modeling systematic errors in laser scanners.* From several papers reporting about errors encountered in laser points one must conclude that there are considerable systematic errors left, even after in flight calibration. This paper is concerned with modeling systematic errors of laser scanning systems. Emphasis is placed on identifying physical error sources and to model them accordingly. The impact of errors, individual or in groups, is analyzed, as well as the recoverability. The magnitude and orientation of individual error vectors changes virtually from point to point – a complex error distribution emerges. Thus, it is a fruitless attempt to eliminate systematic errors without an error model simply by analyzing discrepancies at certain locations in the project area. The analysis provides new insight in the complex error behavior and suggests better strategies for calibrating real systems.

1 Einleitung

Laseraltimetrie vom Flugzeug aus hat sich in den letzten Jahren als eigenständige Methode für topographische Geländeaufnahmen entwickelt. Damit steht dem Anwender neben der Stereophotogrammetrie ein weiteres leistungsfähiges Verfahren zur Verfügung. Photogrammetrie und Laseraltimetrie wurden verschiedentlich miteinander verglichen, siehe z. B. BALTSAVIAS (1999), SCHENK (1999). Die kurze Zeitspanne (Tage) zwischen Befliegung und Endresultat wird allgemein als großer Vorteil der Laseraltimetrie angesehen. Auch lassen sich mit dieser Methode neue Anwendungen erschließen (FLOOD 1999).

Oft wird auch auf die hohe Genauigkeit der Laseraltimetrie hingewiesen. Es gilt allerdings, zwischen dem (hohen) Genauigkeitspotential und den in der Praxis tatsächlich erreichten Genauigkeiten zu unterscheiden. Verschiedene Untersuchungen, z. B. CROMBAGHS et al. (2000), HUISING & GOMES PEREIRA (1998), KILIAN et al. (1996), berichten übereinstimmend von Lagefehlern in der Größenordnung von einigen Dezimetern; festgestellte Höhenfehler sind geringer, erreichen aber die aus der Laserdistanzmessung zu erwartende Genauigkeit nicht. Dieser Stand der Dinge lässt auf nicht kompensierte systematische Fehler schließen und damit auf Probleme bei der Kalibrierung von Laseraltimetrie-Systemen (ACKERMANN

1999). Von einer erfolgreichen Kalibrierung ist zu erwarten, dass Systemfehler aufgedeckt und berücksichtigt werden, so dass die Diskrepanz zwischen Genauigkeitspotential und tatsächlich erreichter Genauigkeit plausibel wird.

Wir stellen in diesem Aufsatz die Modellierung systematischer Fehler eines abtastenden Laseraltimeters vor. Dabei lassen wir uns von den physikalischen Fehlerursachen (den Systemdefekten) leiten. Mit dem vorgeschlagenen Fehlermodell kann man die Auswirkung von systematischen Fehlern, einzeln oder in Gruppen, unter verschiedenen Aufnahmebedingungen studieren. So bietet sich die Möglichkeit, die aus empirischen Untersuchungen bekannten Fehler zu simulieren und zu erklären. Dies wird wohl nicht auf Anhieb vollständig gelingen und entsprechende Modellverfeinerungen sind erforderlich, bei denen auch zusätzliche Parameter ohne direkten Bezug auf physikalische Systemdefekte eingeführt werden können (Auto-Kalibrierung).

Nach der Herleitung einer allgemeinen Lasergleichung folgt die Modellierung systematischer Fehler. Die Differenz zwischen der mit Fehlern behafteten Lasergleichung und der fehlerlosen Gleichung ergibt die Fehlervektoren, die bezüglich ihrer Auswirkung und Bestimmbarkeit genauer analysiert werden. Diese Analyse erlaubt es, wertvolle Rückschlüsse für die Kalibrierung zu gewinnen. Das Hauptgewicht dieses Beitrages liegt im Versuch, geeignete Modelle für systematische Fehler zu entwickeln. Wir suchen dabei die Antwort nicht in der Analyse einzelner Datensätze, sondern in der Analyse der Fehlerursachen. So besteht die Aussicht, allgemein gültige Fehlermodelle zu finden.

Beim Versuch, aus Laseraltimeterdaten Genauigkeiten abzuleiten, stellen sich interessante Probleme. Zunächst ist festzuhalten, dass die Messungen, aus denen Laserpunkte berechnet werden, keine interne Redundanz haben – dies im Gegensatz zur Photogrammetrie ($r = 2 \cdot n - 3$, $n =$ Anzahl der Luftbilder). Ein weiteres Problem ergibt sich aus der Tatsache, dass man den Laserstrahl nicht auf bestimmte Objekte,

wie z. B. Kontrollpunkte oder markante Geländepunkte, richten kann. Will man Genauigkeiten aus dem Vergleich von identischen Punkten herleiten (Laserpunkt und Passpunkt, Laserpunkte in überlappenden Streifen etc.), geht das in dieser Form nicht. Wir haben es hier mit dem Zuordnungsproblem von Flächen zu tun, das man wie folgt beschreiben kann: Gegeben sind zwei Punkthaufen, die zur selben physikalischen Oberfläche gehören. Die Dichte, Verteilung und Genauigkeit der Punkte in beiden Mengen sind verschieden. Gesucht sind identische Flächenmerkmale, die aus den beiden Punkthaufen abzuleiten und mit diesen konsistent sind.

2 Allgemeine Lasergleichung

In Anlehnung an LINDENBERGER (1993) leiten wir in diesem Abschnitt eine allgemeine Lasergleichung ab, um einen direkten Zusammenhang zwischen Laserpunkt und den gemessenen Größen eines abtastenden Laseraltimeters herzustellen. Das Gesamtsystem umfasst das eigentliche Laser-Scanning-

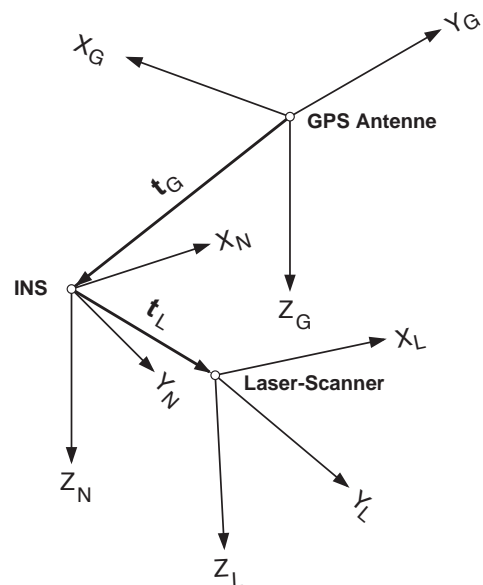


Abb. 1: Koordinatensysteme eines abtastenden Laseraltimeters, bestehend aus dem Laser-Scanner (X_L, Y_L, Z_L), der INS-Einheit (X_N, Y_N, Z_N) und dem GPS-Empfänger (X_G, Y_G, Z_G).

System und das Navigationssystem, bestehend aus INS und GPS. Abb. 1 zeigt eine schematische Darstellung dieser drei Messsysteme sowie deren Koordinatensysteme. Wir bringen zunächst die drei im Flugzeug eingebauten Systeme miteinander in Beziehung und gehen dann vom beweglichen Flugzeugsystem auf das erdfeste WGS84-System über.

2.1 Laser-Scanning-System

Der Koordinatenursprung des Laser-Scanning-Systems liegt im Nullpunkt der Laserdistanzmessung. Die positive Z_L -Achse weist nach unten und ist identisch mit der Winkelhalbierenden des Abtastwinkels τ . Die positive X_L -Achse weist in die Flugrichtung. Die Abtastrichtung τ_i definiert die aktuelle Richtung des Laserstrahls. Diese Richtung kann entweder mit einer digitalen Winkelerfassung direkt gemessen werden, oder indirekt über die aktuelle Pulszahl i und die Scanfrequenz n wie folgt berechnet werden:

$$\tau_i = \frac{\tau}{2} - i \frac{\tau}{n-2} \quad (1)$$

Da die Abtastebene identisch mit der Y_L , Z_L -Koordinatenebene ist, lässt sich die aktuelle räumliche Richtung eines Laserstrahls im Laser-Scanning-System durch folgende Drehmatrix ausdrücken:

$$\mathbf{R}_L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \tau_i & -\sin \tau_i \\ 0 & \sin \tau_i & \cos \tau_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

Wenn jetzt die gemessene Distanz r zum Geländepunkt als Vektor $\mathbf{r} = [0, 0, r]^T$ dargestellt wird und der Laserstrahl im Gegenurzeiger abgelenkt wird, lässt sich der Laserpunkt P als Ortsvektor durch Gleichung (3) beschreiben:

$$\mathbf{p}_L = \mathbf{R}_L \mathbf{r} \quad (3)$$

Diese Gleichung ist grundsätzlich auch für Lasersysteme mit konischer Ablenkung gültig. Man muss lediglich die Drehmatrix \mathbf{R}_L aus dem Ablenkwinkel und dem Azimut-

winkel ableiten, wie z. B. in HUG (1996) näher gezeigt ist.

2.2 INS-System

Das INS-Koordinatensystem hat seinen Ursprung in dem vom Hersteller bezeichneten System-Nullpunkt. Die Orientierung ist durch das INS-Referenzsystem gegeben. Beim Einbau in das Flugzeug wird die positive X_N -Achse parallel zur Flugzeugachse ausgerichtet. Die Z_N -Achse wird normal so gewählt, dass sie bei normaler Flugzeuglage vertikal nach unten weist. Wählen wir als Einbauwinkel der INS-Einheit $\alpha = \gamma = 0$ und $\beta =$ Nickwinkel, ergibt sich die INS-Einbaudrehmatrix \mathbf{R}_M bezüglich dem Laser-Scanning-System:

$$\mathbf{R}_M = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

Mit dem zum Koordinatenursprung des Laser-Scanning-Systems zeigenden Translationsvektor \mathbf{t}_L lässt sich der Laserpunkt P als Ortsvektor im INS-System wie folgt berechnen:

$$\mathbf{p}_N = \mathbf{R}_M \mathbf{p}_L + \mathbf{t}_L \quad (5)$$

Selbst wenn die INS- und Laser-Scanning-Systeme mit größter Sorgfalt im Flugzeug eingebaut werden, ist die gegenseitige Orientierung der Koordinatensysteme zu ungenau. Die Einbauwerte sind wohl gute Näherungen, müssen aber unbedingt durch eine Kalibrierung in situ genauer bestimmt werden. Wir kommen später noch einmal darauf zurück.

2.3 GPS-System

Das Zentrum der GPS-Antenne bildet den Ursprung des lokalen GPS-Systems. Die positive X_G -Achse weist nördlich in die astronomische Meridianebene und die Z_G -Achse ist parallel zur lokalen Lotrichtung und zeigt nach unten. Die positive Y_G -Achse ist in diesem kartesischen Koordinatensystem somit nach Osten gerichtet.

Die aus dem INS abgeleiteten Neigungswinkel bestimmen die Drehmatrix R_N . Damit ist die Orientierung zwischen INS- und GPS-System hergestellt. Der Translationsvektor t_G stellt die positionsmäßige Beziehung beider Systeme dar (siehe Abb. 1). Für den Ortsvektor des Laserpunktes P im lokalen GPS-System erhalten wir somit:

$$p_G = R_N(p_N + t_G) \quad (6)$$

2.4 WGS84-Koordinatensystem

Die NAVSTAR-Satellitenbahnen sind im WGS84-System definiert. Deshalb wird das lokale GPS-System, das sich ja ständig im Flugverlauf ändert, in das erdfeste WGS84 transformiert. Dazu sind zwei Drehungen erforderlich sowie die Translation t_{GPS} (GPS-Position im WGS84 während des Zeitpunktes der aktuellen Laserdistanzmessung). Die erste Drehung R_G ist durch Lotabweichungen am Aufnahmepunkt definiert. Mit der ellipsoidischen Breite und Länge bewerkstelligt R_W die Transformation in das erdzentrierte WGS84. Der Ortsvektor des Laserpunktes P ist durch folgende Formel bestimmt:

$$p_W = R_W R_G p_G + t_{GPS} \quad (7)$$

Durch Substitution der entsprechenden Ortsvektoren aus den vorangegangenen Gleichungen folgt die allgemeine Lasergleichung:

$$p_W = R_W R_G R_N (R_M R_L r + t_L + t_G) + t_{GPS} \quad (8)$$

Die einzelnen Größen in dieser Gleichung sind entweder direkt gemessen oder interpoliert, wie die untenstehende Kurzzusammenfassung zeigt.

R_W, R_G, t_{GPS}	sind Funktionen der aktuellen Flugzeugposition
R_N, R_L, r	sind direkt gemessene oder interpolierte Werte zum Zeitpunkt der Laserdistanzmessung
R_M, t_L, t_G	sind Einbauparameter

Oft wird vom WGS84 System noch eine Transformation in ein Landeskoordinatensystem oder in ein lokales System, das seinen Ursprung z.B im Projektgebiet hat, vollzogen. Diese zusätzlichen Transformationen sind jedoch für die in dieser Arbeit verfolgte Zielsetzung nicht von Bedeutung.

3 Systematische Fehlerquellen und Größenordnung der Fehler

Mit Gleichung (8) lassen sich die Laserpunkte in einem idealen Laseraltimeter berechnen. Wir analysieren in diesem Abschnitt die wichtigsten systematischen Fehler, die es nach dem Einbau der Systemkomponenten in das Flugzeug zu berücksichtigen gilt. Es ist dann Aufgabe der in situ Kalibrierung, diese Fehler zu bestimmen. Dies wird wohl nie perfekt möglich sein. Die verbleibenden systematischen Restfehler sind bei sorgfältiger Kalibrierung zwar klein, können aber wegen der ungünstigen Fehlerfortpflanzung die Position von Laserpunkten dennoch spürbar beeinflussen. Bei der nachfolgenden Ableitung der systematischen Fehler stehen physikalische Ursachen, d.h. Unvollkommenheiten der Systemkomponenten, im Vordergrund. Die Fehlermodellierung ist generell. Um das Modell auf ein spezifisches System anzuwenden, sind entsprechende Anpassungen erforderlich.

3.1 Systematische Fehler im Laser-Scanning-System

Das im Abschnitt 2.1 eingeführte Koordinatensystem beschreibt ein ideales Scanning-System. Ein wirkliches System weicht davon ab. Wir können dabei zwischen der Laserdistanzmessung und der Winkelmessung unterscheiden.

Der systematische Fehler r_{err} der Laserdistanzmessung ist auf verschiedene Ursachen zurückzuführen, wie z.B. additive Fehlerkonstante oder Abweichungen zur Normatmosphäre, die eine falsche Lichtgeschwindigkeit zur Folge hat. Man nimmt üblich an, dass der systematische Distanzmessfehler dieselbe Größenordnung hat wie der zu-

fällige Fehler, also etwa ± 5 cm bei guten Verhältnissen und entsprechend größer unter weniger günstigen Voraussetzungen.

Gleichung (1) drückt die räumliche Richtung des Laserstrahls als Funktion der aktuellen Pulszahl und Scanfrequenz aus. Die ‚Nullrichtung‘ ist durch die Z_L -Achse festgelegt. In einem realen Ablenssystem, schematisch dargestellt in Abb. 2, ist jedoch die Nullrichtung nicht perfekt identisch mit der Koordinatenachse. In Anlehnung an ähnliche Fehler, z. B. bei der Theodolit-Kreisablesung, nennen wir diese Abweichung *Indexfehler* ε . Ein weiterer systematischer Fehler tritt beim Ablenkwinkel τ auf. Der tatsächliche Ablenkwinkel wird wohl nie genau dem vom Hersteller angegebenen Wert entsprechen. Diese Abweichung wird hier als *Ablenkwinkelfehler* $\Delta\tau$ bezeichnet. Schließlich müssen wir davon ausgehen, dass auch die Abtastebene nicht genau rechtwinklig auf der X_L -Achse steht. Dieser systematische Fehler der Abtastebene lässt sich durch die zwei kleinen Winkel $\Delta\varphi$ und $\Delta\kappa$ definieren.

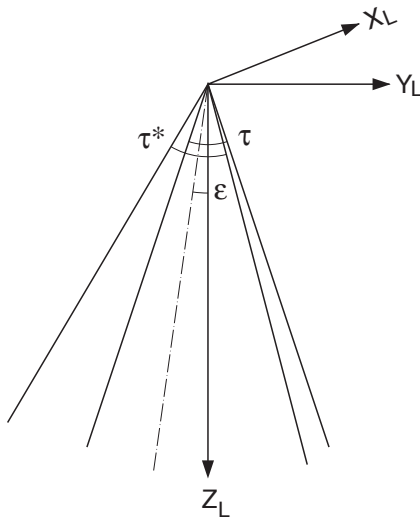


Abb. 2: Darstellung der systematischen Fehler des Ablenssystems. Der Indexfehler ε beschreibt die Abweichung der Z_L -Achse von der Winkelhalbierenden (‚Nullrichtung‘) des Ablenkwinkels. Mit τ^* ist der tatsächliche Ablenkwinkel bezeichnet, der vom nominellen Winkel um den Ablenkungswinkelfehler $\Delta\tau$ abweicht.

Der Indexfehler ε und der Ablenkwinkelfehler $\Delta\tau$ verfälschen die Ablenkrichtung um den Betrag $\Delta\tau_i$, wie untenstehende Gleichungen zeigen.

$$\tau_i^* = \frac{\tau + \Delta\tau}{2} - i \frac{\tau + \Delta\tau}{n - 1} + \varepsilon \tag{9}$$

$$\Delta\tau_i = \tau_i^* - \tau = \varepsilon + \frac{\Delta\tau}{2} - \frac{\Delta\tau}{n - 1} i \tag{10}$$

Es gilt zu beachten, dass der Ablenkrichtungsfehler von der aktuellen Richtung des Laserstrahls abhängt. In der Scanmitte z. B. ist nur der Indexfehler wirksam, wie auch aus Abb. 2 hervorgeht.

Da die Fehler in der Ablenkrichtung und der Ablenebene kleine Größen sind, können wir die Gesamtwirkung relativ zum Scanning-Referenz-System durch die folgende differentielle Drehmatrix beschreiben:

$$\Delta R_L = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\kappa & \Delta\varphi \\ \Delta\kappa & 1 & -\Delta\tau_i \\ -\Delta\varphi & \Delta\tau_i & 1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

Der tatsächliche Ortsvektor des Laserpunktes lautet unter Berücksichtigung der in diesem Abschnitt eingeführten systematischen Fehler somit wie folgt:

$$p_L^* = \Delta R_L R_L (r + \Delta r) \tag{12}$$

Der Fehler am Ortsvektor entspricht der Differenz $p_L^* - p_L$. Über die Größenordnung der systematischen Winkelfehler ist nicht viel bekannt. Da in diesem Aufsatz die Modellierung der Fehler im Vordergrund steht, begnügen wir uns für die Abschätzung der Fehlergrößen mit der Annahme, dass man im Labor die Nullrichtung des Laserstrahls etwa auf 0.006° bestimmen kann (0.1 mm Messfehler bei einer Laserdistanz von einem Meter). Nimmt man als systematischen Fehler das Dreifache an, ergibt sich ein Indexfehler von $\varepsilon \approx 0.02^\circ$. Ähnliche Überlegungen ergeben für den Ablenkwinkelfehler $\Delta\tau \approx 0.03^\circ$.

3.2 Systematische INS-Fehler

Trotz der großen Fortschritte in der Entwicklung von Navigationssystemen muss man mit systematischen Restfehlern in den aus den Kreiselmessungen abgeleiteten Orientierungswinkeln rechnen. Für die Modellierung nehmen wir an, dass die systematischen Fehler während der Flugdauer konstant bleiben. Dies ist sicher eine grobe Vereinfachung der wirklichen Verhältnisse, aber der gegenwärtige Wissensstand, so weit man aus der Literatur schließen kann, lässt keine verbindlichen Schlüsse über andere Modelle zu. Dies trifft ganz besonders auch auf die Abschätzung von Größenordnungen der Fehler zu. Wir gehen hier nicht weiter auf die Ursachen der Fehler ein und nehmen Restfehler aus Angaben von Systemherstellern in der Größenordnung von 0.01° – 0.05° an.

Die kleinen Restfehler im Nick-, Roll- und Kurs-Winkel bestimmen die folgende Drehmatrix ΔR_N , relativ zum INS-Referenz-System:

$$\Delta R_N = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta k & \Delta n \\ \Delta k & 1 & -\Delta r \\ -\Delta n & \Delta r & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

3.3 Systematische GPS-Fehler

Auch hier nehmen wir vereinfachend an, dass der systematische Restfehler in der Position für das Aufnahmegebiet und während der Flugdauer konstant ist. Der Fehlervektor Δt_{GPS} wird zu dem aus den GPS-Messungen errechneten Positionsvektor t_{GPS} addiert. Die in der Literatur mitgeteilten Werte des Fehlervektors schwanken im Bereich von 5 cm bis 30 cm.

3.4 Systematische Einbaufehler der Messsysteme

Die allgemeine Lasergleichung (8) definiert die gegenseitige räumliche Beziehung der idealen Messsysteme. Wir haben dabei die Lage und Orientierung des Laser-Scanning-

Systems bezüglich des INS-Systems durch die Einbaugrößen t_L und R_M beschrieben. Die Koordinatensysteme der Laser-Scan- und INS-Einheit sind physikalisch durch die entsprechenden Messreferenzsysteme festgelegt und von den Herstellern an den Geräten markiert. Nach dem Einbau ist mit relativ großen Fehlern, besonders in der Orientierung, zu rechnen. Nur eine sorgfältige in situ Kalibrierung bringt die Fehler unterhalb akzeptable Grenzen. Dennoch verbleiben systematische Restfehler, die wir wiederum für die Dauer der Befliegung als konstant annehmen. Die Orientierungsfehler bestimmen die Drehmatrix:

$$\Delta R_M = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta \gamma & \Delta \beta \\ \Delta \gamma & 1 & -\Delta \alpha \\ -\Delta \beta & \Delta \alpha & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Die beiden Vektoren t_L und t_G sind als Einbaugrößen ebenfalls mit systematischen Fehlern behaftet. Das mag zunächst etwas gesucht aussehen, da man doch wohl die Entfernungen zwischen den Nullpunkten der Messgeräte auf wenige Zentimeter genau messen kann. Die Orientierung der beiden Vektoren bezüglich des INS-Systems ist hingegen weniger gut bestimmbar. Die Koordinatenfehler sind deshalb grösser als der Distanzfehler.

Zur Vereinfachung kombinieren wir die beiden Translationsvektoren und deren Fehler zu $t_{GL} = t_G + t_L$ und $\Delta t_{GL} = \Delta t_G + \Delta t_L$.

3.5 Systematischer Lotabweichungsfehler

Der Übergang vom lokalen GPS-System in das WGS84-System erfordert zwei Drehungen und eine Translation, siehe Gleichung (6). Für die erste Drehung ist der Winkel zwischen der Normalen zum Ellipsoid und dem lokalen Schwerfeld erforderlich. Wenn das Schwerfeld im Projektgebiet nicht genau bekannt ist, muss man die Abweichung mit einer entsprechenden Fehlermatrix ΔR_G berücksichtigen.

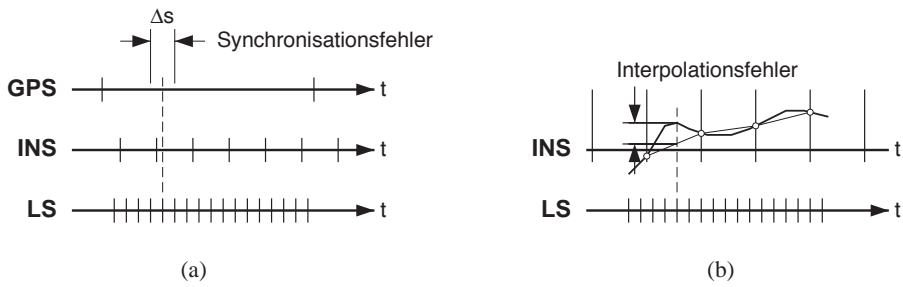


Abb. 3: In (a) sind die drei zeitunabhängigen Messsysteme mit ihren verschiedenen Messfrequenzen dargestellt. Bei der Einführung einer gemeinsamen Zeitachse tritt der Synchronisationsfehler Δs auf. Die viel höhere Messfrequenz des Laser-Scanning-Systems (LS) erfordert eine Interpolation der aus dem INS abgeleiteten Orientierungswinkel. Der dabei entstehende Interpolationsfehler ist in (b) dargestellt.

3.6 Synchronisations- und Interpolations-Fehler

Die drei Messsysteme eines Laseraltimeters sind zunächst unabhängig voneinander. Jedes System hat ein eigenes Referenzsystem und misst mit verschiedenen Frequenzen. Mit Abtastraten von bis zu 10,000 Hz hat das Laser-Scanning-System die höchste Frequenz, gefolgt vom INS-System (bis zu 300 Hz). GPS arbeitet typischerweise mit 1 Hz.

Zur Berechnung eines Laserpunktes ist außer der Laserdistanz die Kenntnis der Orientierungsdrehmatrix R_N und des GPS-Vektors t_{GPS} zum Zeitpunkt des ausgesandten Laserpulses erforderlich. Man muss somit die drei Messsysteme synchronisieren. Da dies nie genau möglich sein wird, führen wir den Synchronisationsfehler Δs ein, veranschaulicht in Abb. 3(a).

Der Synchronisationsfehler hat einen Fehlervektor $\Delta t_s = v \cdot \Delta s$ zur Folge, dessen Größe von der Fluggeschwindigkeit v abhängt und dessen Richtung tangential zur Flugbahn verläuft. Um diesen Fehler vernachlässigen zu können, muss die Synchronisationsgenauigkeit bei einer Fluggeschwindigkeit von 60 m/sec etwa bei 10^{-4} sec liegen. Wir kombinieren einen eventuellen Synchronisationsfehler mit dem systematischen GPS-Fehler Δt_{GPS} , da beide dieselbe Auswirkung haben. Im Folgenden

wird deshalb Δt_s nicht mehr separat behandelt.

Man kann das INS als diskreten Abtaster der Flugzeugorientierung ansehen. Nach NYQUIST müsste dann die Abtastfrequenz das Doppelte der höchsten Signalfrequenz sein, sonst ließe sich die Flugzeugbewegung aus den Abtastwerten nicht vollständig rekonstruieren. Wir bezeichnen diesen Fehler hier als Interpolationsfehler (Abb. 3(b)). Bei INS mit niedriger Messfrequenz, z. B. 50 Hz, können Vibrationen durchaus zu spürbaren Interpolationsfehlern führen. Der Interpolationsfehler hat eher den Charakter eines zufälligen Fehlers. In der nachfolgenden Analyse ist der Interpolationsfehler nicht als systematischer berücksichtigt.

3.7 Zusammenfassung

Mit den in diesem Abschnitt eingeführten systematischen Fehlern erhalten wir folgende modifizierte Lasergleichung:

$$p^*_W = R_W \Delta R_G R_G \Delta R_N R_N (\Delta R_M R_M \Delta R_L R_L (r + \Delta r) + t_{GL} + \Delta t_{GL}) + t_{GPS} + \Delta t_{GPS} \tag{15}$$

In dieser Gleichung drückt der Ortsvektor p^*_W den fehlerhaften Laserpunkt im WGS84-System aus. Typische Größenordnungen der systematischen Fehler sind in Tab. 1 enthalten.

Tab. 1: Systematische Fehler und ihre Größenordnung.

Fehlerquelle	Größenordnung	Bemerkungen
ΔR_G	0.017°	max. Lotabweichungsfehler
ΔR_N	0.01°	INS-Fehler
ΔR_M	0.3°/0.01°	vor/nach in situ Kalibrierung
ΔR_L	$\varepsilon = 0.02^\circ$, $\Delta\tau = 0.03^\circ$	Indexfehler, Ablenkungswinkelfehler
Δr	5 – 10 cm	Laserdistanzfehler
Δt_{GL}	5 cm/3 cm	vor/nach in situ Kalibrierung
Δt_{GPS}	10 cm	GPS + Synchronisierungsfehler

4 Fehleranalyse

Die Differenz zwischen Gleichung (15), fehlerbehaftetes System, und Gleichung (8), fehlerfreies System, ergibt den Fehlervektor $e = p^*_W - p_W$. Dieser Fehlervektor ist eine Funktion der Aufnahmegeometrie und der systematischen Fehler. Es bietet sich nun an, explizite Ausdrücke für die einzelnen systematischen Fehler zu finden. Damit lassen sich die Auswirkungen der Fehler, einzeln oder gesamt, analytisch bestimmen. Außerdem wird es dadurch auch möglich, die Bestimmbarkeit der Fehler zu analysieren. Daraus folgen Strategien, wie die Fehler am besten bestimmt werden können – ein äußerst wünschenswertes Ergebnis angesichts der heute vorherrschenden ad-hoc Kalibrationsverfahren.

4.1 Beispiel einer expliziten Fehlerbestimmung

Aus Platzgründen verzichten wir hier auf die Herleitung von expliziten Ausdrücken aller systematischen Fehler, schildern aber das generelle Vorgehen am Beispiel der Einbaudrehmatrix. Für eine eingehende Ableitung der übrigen Fehler sei der interessierte Leser auf SCHENK (2001) verwiesen.

Die Einbaudrehmatrix R_M drückt die Orientierung des Laser-Scanning-Systems bezüglich des INS-Koordinatensystems aus. Mit ΔR_M haben wir einen systematischen Fehler eingeführt, den es jetzt zu bestimmen

gilt. Dazu ändern wir vorerst Gleichung (15) so, dass nur der systematische Fehler ΔR_M auftritt und Fehler höherer Ordnung vernachlässigt werden.

$$p_W^{\Delta R_M} = R_W R_G (R_N \Delta R_M R_M R_L r + t_{LG}) + t_{GPS} \tag{16}$$

Von dieser modifizierten Gleichung wird die fehlerfreie Gleichung (8) subtrahiert. Daraus folgt der systematische Fehlervektor

$$e_W^{\Delta R_M} = R_W R_G [R_N (\Delta R_M - I) R_M R_L r] \tag{17}$$

Interessant sind die Fehler an Extremstellen wie z. B. am Anfang und Ende der Abtastzeile. Beschränken wir uns auf eine Abtastzeile, können wir annehmen, dass in dieser kurzen Zeitspanne die drei Drehmatrizen R_W , R_G und R_N konstant bleiben. Verzichten wir jetzt auf die Darstellung des Fehlervektors im WGS84-System und gehen auf das lokale INS-System über, vereinfacht sich obiger Ausdruck zu

$$e_i^{\Delta R_M} = R_{const} (\Delta R_M - I) R_M R_L r \tag{18}$$

Der Subindex i in $e_i^{\Delta R_M}$ bringt zum Ausdruck, dass der Fehler abhängig ist von der aktuellen Lage des Laserstrahls, also von der Ablenkrichtung τ_i . Mit den in Gleichungen (4) und (2) definierten Drehmatrizen R_M und R_L sowie $r = [0, 0, r_i]^T$ lassen sich die Komponenten des Fehlervektors explizit angeben:

$$e_i^{\Delta R_M} = r_i \begin{bmatrix} \Delta\gamma \sin \tau_i & + \Delta\beta \cos \beta \cos \tau_i \\ \Delta\gamma \sin \beta \cos \tau_i & - \Delta\alpha \cos \beta \cos \tau_i \\ -\Delta\beta \sin \beta \cos \tau_i & - \Delta\alpha \sin \tau_i \end{bmatrix} \tag{19}$$

Bei horizontalem Gelände ist $r_i = H / \cos \tau_i$, wobei H die Flughöhe und τ_i die Ablenkrichtung bedeuten. Obige Gleichung lautet mit dieser Annahme:

$$e_i^{\Delta R_M} = H \begin{bmatrix} \Delta\gamma \tan \tau_i & + \Delta\beta \cos \beta \\ \Delta\gamma \sin \beta & - \Delta\alpha \cos \beta \\ -\Delta\beta \sin \beta & - \Delta\alpha \tan \tau_i \end{bmatrix} \tag{20}$$

Die Winkel $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ und $\Delta\gamma$ sind die systematischen Fehler der Einbaudrehmatrix.

Der Einbauwinkel β entspricht üblicherweise dem Nickwinkel des Flugzeuges, damit bei einem Ablenkwinkel $\tau_i = 0^\circ$ der Laserstrahl vertikal nach unten weist. Da dieser Winkel relativ klein ist, kann man Gleichung (20) noch weiter vereinfachen, indem das Produkt zweier kleiner Winkel vernachlässigt wird (z. B. $\Delta\gamma \sin\beta \approx 0$).

$$e_i^{\Delta R_M} \approx H \begin{bmatrix} \Delta\gamma \tan\tau_i + \Delta\beta \\ -\Delta\alpha \\ -\Delta\alpha \tan\tau_i \end{bmatrix} \quad (21)$$

Aus dieser Gleichung folgt unmittelbar, dass die planimetrischen Fehlerkomponenten bedeutend größer sind als der Höhenfehler. In der Mitte der Abtastzeile ($\tau_i = 0^\circ$) ist kein Höhenfehler zu erwarten. Schließlich ist zu sehen, dass der Höhenfehler am Anfang und Ende der Abtastzeile ungleich groß ist. Daraus folgt die interessante Tatsache, dass die Einbaufehler eine horizontale Ebene scheinbar neigen und zwar um den Winkel $\Delta\alpha$, bezogen auf eine Achse parallel zur Flugrichtung.

4.2 Zusammenfassung der systematischen Fehler

Für die übrigen systematischen Fehler lassen sich ebenfalls Formeln ableiten, die die Fehlerkomponenten als Funktion der Aufnahmegeometrie und Geländetopographie

ausdrücken. Wir verzichten hier auf eine eingehende Darstellung, geben aber in Tab.2 numerische Werte für die einzelnen Fehlerkomponenten an, wie sie sich für eine simulierte Befliegung über horizontalem Gelände, Flughöhe $H = 1000$ m und einem Laser-Scanner mit Ablenkwinkel $\tau = 30^\circ$ ergeben.

Tab.2 enthält Werte für systematische Fehler der Laserdistanzmessung Δr , des Ablenkensystems ΔR_L , der Einbaumatrix ΔR_M und der Orientierungsmatrix ΔR_N . Die zweite Kolonne enthält die angenommenen Fehler, mit denen man selbst nach sorgfältiger Kalibrierung in situ rechnen muss. Die Fehler sind jeweils für drei Positionen des Scanners angegeben: Anfang (L), Mitte (M), Ende (R) der Laserstrahlablenkung. Die letzte Kolonne zeigt die Auswirkung der unsymmetrischen Höhenfehler an den Ablenkenden. Die aus den Laserpunkten rekonstruierte Ebene wird gegenüber der Soll-ebene geneigt. Die Drehachse ist parallel zur Flugrichtung. Da sich systematische Fehler im schlimmsten Fall addieren, erhalten wir im angeführten Beispiel eine totale Neigung von 0.05° . Das entspricht bei der Spurbreite von 536 Metern einem Höhenfehler von knapp einem halben Meter. Natürlich werden in wirklichen Systemen die Winkelfehler in verschiedenen Vorzeichenkombinationen vorkommen, so dass sich die Neigungsfehler z. T. aufheben.

Tab. 2: Fehlerkomponenten für eine simulierte Befliegung aus 1000m Flughöhe und mit einem Laser-Scanner mit 30° Ablenkwinkel. Die Fehler sind jeweils für die drei Positionen Streifenanfang (L), Streifenmitte (M) und Streifenende (R) angegeben.

Fehler	Fehlergrößen		Fehlerkomponenten [m]			Neigungsfehler
			x	x	z	
Δr	0.10 m	L	0.00	- 0.026	0.097	-
		M	0.00	0.000	0.100	
		R	0.00	0.026	0.097	
ΔR_L	$\Delta\varphi = \Delta\kappa = 0.03^\circ$ $\Delta\tau = 0.03^\circ$ $\varepsilon = 0.02^\circ$	L	0.66	- 0.61	- 0.16	ε
		M	0.52	- 0.35	0.00	
		R	0.38	- 0.09	0.02	
ΔR_M	$\Delta\alpha = - 0.01^\circ$ $\Delta\beta = - 0.02^\circ$ $\Delta\gamma = - 0.01^\circ$	L	- 0.40	0.17	0.05	$\Delta\alpha$
		M	- 0.35	0.17	0.00	
		R	- 0.30	0.17	- 0.05	
ΔR_N	$\Delta r = 0.02^\circ$ $\Delta\eta = 0.015^\circ$ $\Delta k = 0.015^\circ$	L	0.33	- 0.35	- 0.09	Δr
		M	0.26	- 0.35	0.00	
		R	0.19	- 0.35	0.09	

Deutlich folgt auch aus der Analyse, dass die Fehlervektoren verschiedene Orientierung und Größe besitzen, und zwar in Abhängigkeit von der Flugzeugorientierung, der Ablenkrichtung, der Flughöhe und der Geländetopographie. Hier erkennt man die Aussichtslosigkeit, aus aktuellen Laserdaten ein globales Fehlermodell abzuleiten. Ferner fallen auch die relativ großen Lagefehler quer zur Flugrichtung auf. Die aus den Laserpunkten abgeleitete Oberfläche ist verzerrt; man sollte deshalb Laserpunkthaufen nicht ohne weiteres mit einer Ähnlichkeitstransformation auf Punkthaufen, die in orthogonalen Koordinatensystemen dargestellt sind, abbilden. Die Lagefehler Δx , Δy verursachen bei geneigten Oberflächen einen sekundären Höhenfehler, den man wie folgt berechnen kann:

$$\Delta z = \Delta x \cdot \tan \phi + \Delta y \cdot \tan \psi \quad (22)$$

Die zwei Winkel $\Delta \phi$, $\Delta \psi$ definieren die Hangneigung. Wie den Werten in Tab. 2 zu entnehmen ist, wird der sekundäre Höhenfehler bei Hangneigungen von $> 10^\circ$ größer als der primäre Fehler. Schließlich sei noch darauf hingewiesen, dass man die Lagefehler ganz besonders bei der Objektextraktion aus Laserpunkten berücksichtigen muss.

4.3 Zur Bestimmbarkeit der systematischen Fehler

Wir haben uns bis jetzt auf die Modellierung systematischer Fehler konzentriert, wie sie auf Grund von Unzulänglichkeiten im Gesamtsystem eines Laseraltimeters unweigerlich auftreten. Mit den Gleichungen (8) und (15) lassen sich die Fehler in Abhängigkeit von der Aufnahmegeometrie (Flugzeugorientierung R_N , Ablenkwinkel R_L , Flughöhe H , Geländetopographie) bestimmen. Interessant ist nun die Aufgabe, die systematischen Fehler aus den Fehlervektoren rückwärts zu bestimmen (Systemkalibration). Generell stehen bei der Kalibration drei Probleme an: Modellierung, Zuordnung und Bestimmbarkeit. Wir wollen uns hier kurz mit der Bestimmbarkeit der im Modell vorkommenden systematischen Fehler befassen

und mit einem negativen Beispiel auf den Kern des Problems hinweisen. Systematische Fehler lassen sich dann nicht einzeln bestimmen, wenn ihre Auswirkung identisch ist, d.h. ihre Fehlervektoren immer dieselbe Orientierung haben.

Man kann nun die Aufnahmegeometrie für Kalibrationszwecke so wählen, dass möglichst alle Fehler bestimmbar werden. In der Flugzeugorientierung ist man z. B. bezüglich Flugrichtung völlig frei. Durch spezielle Manöver lassen sich auch Roll- und Nickwinkel in Grenzen variieren. Die Ablenkrichtung ist innerhalb des fest vorgegebenen Ablenkwinkels frei wählbar. Schließlich ist die Flughöhe in Grenzen frei wählbar und auch das Gelände – für Kalibrationszwecke können besonders gut geeignete Oberflächen ausgesucht werden. Man erkennt, dass die Bestimmbarkeit der systematischen Fehler von der Kombination der frei wählbaren Faktoren der Aufnahmegeometrie abhängt.

Eine eingehendere Untersuchung zeigt, dass durch geeignete Kombinationen von Hin- und Rückflügen und Abtastrichtungen verschiedene systematische Fehler einzeln bestimmbar sind (SCHENK 2001) oder gegebenenfalls automatisch kompensiert werden können. Als Beispiel zeigen wir im nächsten Abschnitt, wie ein systematischer Orientierungsfehler unabhängig von allen übrigen Fehlern bestimmt werden kann.

4.4 Direkte Bestimmung des systematischen Orientierungsfehlers

Im Abschnitt 3.2 wurden die systematischen Restfehler der aus dem Navigationssystem abgeleiteten Nick-, Roll- und Kurs-Winkel in der Drehmatrix ΔR_N zusammengefasst. Wir zeigen nun, wie ein konstanter INS-Fehler ohne Kontrollpunkte und unabhängig von allen anderen systematischen Fehlern bestimmt werden kann.

Aus Gleichung (15) erkennt man, dass mit Ausnahme von ΔR_N alle anderen systematischen Fehler mit der Orientierungsmatrix R_N multipliziert werden. Das hat für einen identischen Hin- und Rückflug die interessante Konsequenz, dass die planimetrischen

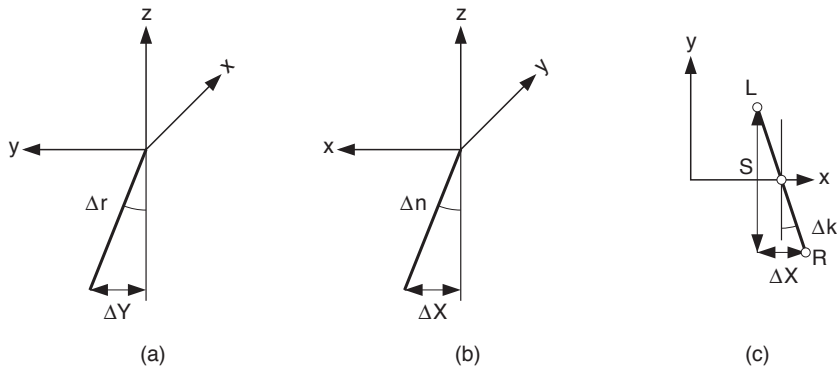


Abb. 4: Orientierungsfehler verursachen planimetrische Verschiebungen des Laserpunktes. Ein Rollwinkelfehler verursacht eine Verschiebung quer zur Flugrichtung (a); der Nickwinkel eine Verschiebung in Flugrichtung (b). Ein Kurswinkelfehler dreht die Abtastzeile (c). Aus diesen Verschiebungen können die Fehler direkt bestimmt werden.

Fehlerkomponenten entgegengesetzte Vorzeichen erhalten. Davon kann man sich leicht überzeugen, wenn in R_N für den Rückflug der Kurswinkel um 180° geändert wird. Nimmt man jetzt noch an, dass sich Nick- und Roll-Winkel für Hin- und Rückflug nur geringfügig unterscheiden, folgt die bemerkenswerte Tatsache, dass sich die planimetrischen Komponenten aller Fehler rechts von R_N aufheben. Damit ist das Verfahren zur Bestimmung der INS-Fehler gegeben: aus den planimetrischen Differenzen zwischen Hin- und Rückflug lässt sich ΔR_N bestimmen.

Nehmen wir der Einfachheit halber einen Ost-West-Flug an. Der Nickwinkelfehler Δn lässt sich dann einfach aus der X -Differenz an der vertikalen Stelle des Laserstrahls (in Abtastmitte, $\tau_i = 0$) und der Flughöhe H bestimmen (s. Abb. 4). Der Rollwinkelfehler Δr folgt entsprechend aus der Y -Differenz. Für die Bestimmung des Kurswinkelfehlers brauchen wir die X -Differenzen an den Spurrändern, sowie die Spurbreite S , die sich aus der Flughöhe H und dem Abtastwinkel τ ergibt ($S = 2 \cdot H \tan(\tau/2)$).

$$\Delta r = \frac{\Delta Y}{H} \quad (23)$$

$$\Delta n = \frac{\Delta X}{H} \quad (24)$$

$$\Delta k = \frac{\Delta X^L - \Delta X^R}{2 \cdot H \tan(\tau/2)} \quad (25)$$

Die hier dargestellte Lösung des Problems ist auf die Bestimmung von Differenzen zurückgeführt. Das ist insofern attraktiv, als für die Bestimmung von Differenzen keine Positionsinformation aus dem Objektraum nötig ist: INS-Fehler lassen sich ohne Kontrollpunkte bestimmen! Die einzige Bedingung ist, dass die Differenzen zwischen Hin- und Rückflug an identischen Punkten bestimmt werden. Hier liegt die Krux; der Laserstrahl lässt sich nicht auf bestimmte Objektpunkte richten, man kann deshalb nicht auf identische Punkte hoffen. Wir haben es hier mit dem eingangs erwähnten Zuordnungsproblem zu tun.

Um Oberflächen, die durch Punktmengen bestimmt sind, einander zuordnen zu können, ist es vorteilhaft, von Punkten auf abgeleitete Geländemerkmale überzugehen, wie z.B. Bruchkanten. Sie lassen sich aus Laserpunkten berechnen, indem man zuerst die Gesamtoberfläche in ebene Flächenstücke segmentiert (siehe z. B. LEE & SCHENK

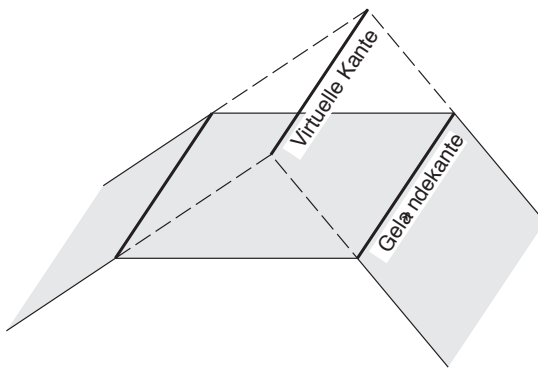


Abb. 5: Laseraltimeter können nicht direkt Geländebruchkanten erfassen. Durch eine Segmentierung in ebene Flächenstücke lassen sich aber Kanten als Schnittgeraden benachbarter Ebenen berechnen. Nicht alle Schnittgeraden sind jedoch Bruchkanten, wie die in (b) dargestellte virtuelle Kante zeigt.

2001) und danach benachbarte Ebenen schneidet. Abb. 5 zeigt, dass auch Schnitte von nicht direkt benachbarten Ebenen möglich sind. Die daraus abgeleiteten virtuellen Kanten sind für unser Vorhaben ebenfalls zweckmäßig. Virtuelle Kanten sind sogar vorzuziehen, wenn sie bessere Genauigkeiten für die berechnete Schnittgerade geben.

5 Ausblick

Der Schwerpunkt in diesem Beitrag lag auf der Modellierung systematischen Fehler eines abtastenden Laseraltimeters. Dabei wurde die Auffassung vertreten, dass Fehler erster Ordnung nach dem physikalischen Verursacherprinzip definiert werden. Mit dem vorgeschlagenen Modell kann man Fehler simulieren, also voraussagen. Die Analyse der mit systematischen Fehlern behafteten Lasergleichung führt zu wichtigen Schlüssen. Die Fehlervektoren – einzeln, in Gruppen oder als Summe – ändern sich in Größe und Orientierung von Punkt zu Punkt. Ohne Fehlermodell ist es daher aussichtslos, aus den in den Daten an einzelnen Stellen (z. B. in der Streifenüberlappung) festgestellten Fehlern Regeln abzuleiten, wie die Fehler an anderen Stellen zu beheben wären. Die Untersuchungen bestätigen auch bekannte Tatsachen, wie z. B. deutlich größere Lagefehler als Höhenfehler. Andere Konsequenzen sind vielleicht überraschender. Als Beispiel stellen wir die typische mäanderförmige Befliegung einer unüblichen

Befliegung gegenüber, bei der die einzelnen Streifen die gleiche Flugrichtung haben. Wie gezeigt, heben sich die planimetrischen Fehler, mit Ausnahme des Orientierungsfehlers, bei einem Hin- und Rückflug auf. Die Mittelung identischer Punkte würde deshalb den systematischen Gesamtfehler auf den Orientierungsanteil reduzieren. Bei der zweiten Fluganordnung würde derselbe Vorgang keine Verbesserung bringen.

Für die Praxis ist der umgekehrte Vorgang wichtiger, nämlich aus festgestellten Fehlervektoren auf die verursachenden systematischen Fehler zu schließen. Die heute verwendeten Kalibrationsverfahren sind unvollkommen, wie man aus der Tatsache schließen muss, dass nach der Kalibrierung noch erhebliche systematische Fehler unberücksichtigt bleiben. Sie sind verantwortlich dafür, dass das Genauigkeitspotential von Laseraltimeter-Systemen noch nicht erreicht ist. Das Fehlermodell, die Zuordnung und die Bestimmbarkeit der Fehler sind drei wichtige Aspekte der Kalibrierung. Das hier vorgestellte Fehlermodell wurde erfolgreich für die Kalibrierung eines Laser-Profilmessers eingesetzt (FILIN & CSATHÓ 2001).

Gegenwärtig sind Arbeiten im Gange, die in praktischen Datensätzen festgestellte Diskrepanzen mit dem Fehlermodell zu erklären. Dies wird wohl nicht auf Anhieb vollständig gelingen und zu entsprechenden Modellverfeinerungen führen. Außerdem befassen wir uns intensiv mit dem Zuordnungsproblem von Flächen, auf das wir hier

aus Platzgründen leider nicht näher eingehen konnten. Ziel dieser Anstrengungen ist es, Anstöße für effektivere und transparentere Kalibrationsverfahren zu geben.

6 Literaturverzeichnis

- ACKERMANN, F., 1999: Airborne laser scanning-present status and future expectations. – ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, **54** (2/3): 64–67.
- BALTSAVIAS, E., 1999: A comparison between photogrammetry and laser scanning. – ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, **54** (2/3): 83–94.
- CROMBAGHS, M. J. E., R. BRÜGELMANN & DE MIN, E. J., 2000: On the adjustment of overlapping strips of laser altimeter height data. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, **33** (B3/1): 230–237.
- FILIN, S. & CSATHÓ, B., 2001: Improvement of elevation accuracy for mass balance monitoring using in-flight laser calibration. – Annals of Glaciology, Vol. **34**, in press.
- FLOOD, M., 1999: Commercial Development of Airborne Laser Altimetry. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, **32** (3W14): 13–20.
- HUG, CH., 1996: Entwicklung und Erprobung eines abbildenden Laseraltimeters für den Flugeinsatz unter Verwendung des Mehrfrequenz-Phasenvergleichsverfahrens. – DGK, Nr. 457, 122 S.
- HUISING, E. J. & GOMES PEREIRA, L. M., 1998: Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications. – ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, **53** (5): 245–261.
- KILIAN, J., HAALA, N. & ENGLISH, M. (1996): Capture and evaluation of airborne laser scanner data. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, **31** (B3), 383–388.
- LEE, I. & SCHENK, T., 2001: Autonomous extraction of planar surfaces from airborne laser scanning data. – Proc. ASPRS Ann. Convention, St. Louis
- LINDENBERGER, J., 1993: Laser-Profilmessungen zur topographischen Geländeaufnahme. – DGK, Nr. 400, 131 S.
- SCHENK, T., 2001: Modeling and analyzing systematic errors in airborne laser scanners. – Technical Notes in Photogrammetry, OSU, No. 19, 39 S.
- SCHENK, T., 1999: Photogrammetry and Laser Altimetry. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, **32** (3W14): 3–12.

Anschriften der Verfasser:

Prof. Dr. TONI SCHENK
Department of Civil and Environmental
Engineering and Geodetic Science
The Ohio State University
2070 Neil Ave., Columbus, OH 43210
Tel.: 614-292-71 26, Fax: 614-292-29 57
e-mail: schenk.2@osu.edu

Dr. BEÁTA CSATHÓ
Senior Research Associate
Byrd Polar Research Center
The Ohio State University
1090 Carmack Road, Columbus, OH 43210
Tel.: 614-292-66 41, Fax: 614-292-46 97
e-mail: csatho.1@osu.edu

Manuskript eingereicht: Februar 2001
Angenommen: März 2001

Berichte

International Workshop on Recreating the Past – Visualization and Animation of Cultural Heritage

Vom 26. Februar bis 1. März 2001 fand in Ayutthaya, Thailand, ein internationaler Workshop zum Thema Visualisierung des Kulturerbes statt. Er wurde von der ISPRS Arbeitsgruppe V/6 – “Visualization and Animation” (ARMIN GRÜN, SHUNJI MURAI) gemeinsam mit CIPA (The ICOMOS / ISPRS Committee for Documentation of Cultural Heritage, früher: International Committee for Architectural Photogrammetry, PETER WALDHÄUSL, CLIFF OGLEBY) unter tatkräftiger Unterstützung einer lokalen thailändischen Organisiatorengruppe ausgerichtet. Ayutthaya war von den Veranstaltern u.a. wegen seines prominenten Status auf der Liste des Weltkulturerbes der UNESCO ausgesucht worden.

Die insgesamt 61 Teilnehmer kamen aus 13 Ländern. Stärkste Delegationen stellten dabei Japan und Thailand mit je 19 und die Europäische Union mit 18 Kollegen, davon 5 aus Deutschland. In 30 Vorträgen und 8 Posterpräsentationen wurde einerseits ein Überblick über die augenblicklichen Entwicklungen der Digital-Photogrammetrie und Visualisierungstechniken gegeben aber auch grundlegende Fragen wie z. B. über den Sinn und die Authentizität der erzielten Ergebnisse solcher Techniken diskutiert.

Die breite Palette von Plattformen zur Datenerfassung im Bereich der Kulturgutvermessung reicht von Satelliten über Leichtflugzeuge und Modellhelikopter bis zum Vermessungsstativ. Die dazu passenden Sensoren können sowohl bildgebend sein (Digital- oder Analogkameras jedweder Art) oder rein geometrische (Tachymeter) oder unstrukturierte Daten (Laserscanner) generieren. Jedes dieser Verfahren hat seine Stärken und Schwächen in der Erfassung globaler Formen oder in der Modellierung von Details mit hoher Punktdichte. Die daraus folgende, notwendige Kombination

bzw. die Zusammenführung solch unterschiedlicher Ausgangsdaten bereitet noch vielfältige Schwierigkeiten und ist Gegenstand von Entwicklungen bzw. Untersuchungen mehrerer Gruppen.

Die besondere Gefährdung von Kulturgut in den Ländern der 3. Welt einerseits durch potenzielle Einwirkung von Gewalt und andererseits durch Mangel an Ressourcen zum Schutz bzw. zur Erhaltung der Kulturdenkmäler verlangen nach Low-Cost Methoden zu deren rascher Dokumentation. Die während des Workshops eintreffende Ankündigung des Taliban-Regimes, alle Buddha-Statuen in Afghanistan zerstören zu wollen, machte schnell selbst einem eventuell noch skeptischen Teilnehmer die Brisanz und Aktualität des Themas klar. Dass das bloße Propagieren von High-End Lösungen zur Befriedigung der eigenen wissenschaftlichen Bedürfnisse zur Lösung dieser Problematik nicht oder zumindest nur in kleinsten Bereichen beitragen kann, wurde in mehreren Beiträgen leidenschaftlich unterstrichen.

Neben der Erfassung der Daten war – dem Generalthema entsprechend – der Darstellung bzw. Visualisierung von historischen Bauten und archäologischen Artefakten eine große Zahl von Präsentationen gewidmet. Die geometrische Modellierung, Oberflächendefinition mit und ohne Fototextur sowie die interaktive Begegnung mit virtuellen Welten bis hin zum virtuellen Museum im Internet ist technisch beherrscht und wartet bereits auf ihre Anwendung. Die Einbindung der Daten in Informationssysteme zur einfachen raumbezogenen Analyse durch den Anwender fordert einfache 3D-GIS Applikationen und Strukturen, die auch durch unerfahrene Enduser beherrschbar sind.

In der Schlussdiskussion war die Hoffnung nach einer Standardisierung und daher breiteren Anwendung der vorgestellten Techniken durch Kostenreduktion in den Bereichen Bildung, Dokumentation, Re-

konstruktion, Restaurierung und Schadensanalyse von historisch bedeutenden Bauwerken unüberhörbar.

Den krönenden Höhepunkt bildete eine Exkursion zur Tempelanlage in Phimai, ca. 200 km nordöstlich von Ayutthaya. Diese Anlage ist vermutlich älter (etwa 11. Jh.) als ihre „Schwester“ Angkor Wat in Kambodscha und veranschaulichte uns den Einfluss der Khmer in diesem Gebiet über viele Jahrhunderte ebenso wie die nicht zu unterschätzenden Probleme in der Erfassung solch komplexer Architektur.

Die Beiträge wurden als Band XXXIV, Teil 5/W1 in den International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing der ISPRS veröffentlicht.

KLAUS HANKE, Innsbruck

OEEPE Workshop „Airborne Laser-scanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models“ in Stockholm vom 1. bis 3. März 2001

Die beiden OEEPE-Arbeitsgruppen „Airborne Interferometric SAR“ – Leitung I. DOWMAN und „Laser data acquisition“ – Leitung P. AXELSSON und B. PETZOLD organisierten am Royal Institute of Technology, Department of Geodesy and Photogrammetry in Stockholm den gemeinsamen Workshop. Professor KENNERT TORLEGÅRD konnte bei der Eröffnung ca. 100 Tagungsteilnehmer aus 21 Ländern begrüßen.

Einen Überblick zum Entwicklungsstand des Airborne Interferometric SAR und die im Rahmen der OEEPE unternommenen Aktivitäten gab I. DOWMAN. Über den Stand des Laser-Scannverfahrens gaben B. PETZOLD/P. AXELSSON den Überblick.

Der Workshop gliederte sich in die drei Themenschwerpunkte:

- SAR-Aufnahmesysteme und Bearbeitungsalgorithmen,
- Laserscanneraufnahmen (Algorithmen, Anwendungen, Firmen) und
- SAR, Laserscanning und DHM, Vergleiche und Aspekte.

Die Schwerpunkte wurden neben den Vorträgen durch Anwenderberichte, Firmenpräsentationen, Poster und Demonstrationen ergänzt.

SAR-Systeme und deren Bearbeitungsalgorithmen

In diesem Block stellten Vertreter aus unterschiedlichen Einrichtungen Ergebnisse und Erfahrungen mit Radarbefliegungen vor. So berichtete RUIZ, A. vom Institut Cartografic de Catalunya über ein Projekt in Venezuela, wo auf der Basis der Radardaten ein 5-m-DGM berechnet und daraus Höhenlinien abgeleitet wurden. In Großbritannien (BAKER, D.) werden die Daten für die Aktualisierung der Relieffolien und des Grundrisses der Topographischen Karten 1 : 10 000 und 1 : 25 000 benutzt. ROMBACH, M. berichtete, dass durch die simultane Abtastung der Erdoberfläche im X- und P- Band nicht nur ein Digitales Oberflächenmodell, sondern auch ein Digitales Geländemodell berechnet werden konnte. Eine interessante Anwendung für die Modellierung von großräumigen Hochwasserszenarien an der Themse stellte TABUCHI, S. vor. Bei allen Anwendungsbeispielen war erkennbar, dass mit einer sehr geringen Anzahl oder überhaupt keinen Passinformationen gearbeitet wurde. Dementsprechend können die getroffenen Angaben für die erreichten Höhengenaugigkeiten, sie lagen alle im Meterbereich, auch nur als Richtwerte für die Genauigkeit des Verfahrens angesehen werden.

Laserscanneraufnahmen

Im zweiten Schwerpunkt wurde deutlich, dass bei der Anwendung der Laserscanneraufnahme schon mehr Erfahrungen vorliegen und man sich verstärkt mit der Untersuchung zur Minimierung von Fehlereinflüssen des Aufnahmesystems und der Verbesserung der Auswertalgorithmen beschäftigt. So arbeitete SCHENK, T. in seinem Vortrag anschaulich den Einfluss des Lagefehlers auf den Höhenfehler bei der Punkt-

bestimmung heraus. Er empfahl zur Verbesserung der DGM-Genauigkeit zusätzliche Informationen von markanten Oberflächenstrukturen in die Berechnung einzuführen. Zur Kalibrierung des INS haben sich ein Hin- und Rückflug des selben Flugstreifens bewährt.

Umfassende Auswertungen von Laserscannerbefliegungen stellten PFEIFFER, N. und VOSSELMANN, G. vor. So konnten bei unterschiedliche Projekten Genauigkeitsangaben in Abhängigkeit von der Datenendung (von 2 cm bis < 40 cm) und Hinweise für die Kalibrierung der Laser mittels Patches und Profilen gemacht werden. Ebenso sind die aufgestellten Forderungen an die Messpunktdichte erwähnenswert. Man geht von 5 bis 6 Messpunkten/m² aus, um o.g. Genauigkeiten zu erreichen.

Auftraggeber für diese Aufnahmetechnik sind in Schweden z.B. die Straßenverwaltungen (AXELSSON, A.), in Finnland die Forstverwaltungen zur Waldbestandsaufnahme (HYYPÄ, J.) und in Deutschland die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung zum Aufbau digitaler Wasserlauf-DGM (BROCKMANN, H.). Andere Anwendungen befassen sich z. B. mit dem Früherkennen von zu erwartenden Hangrutschungen (FAZIO, C.).

Anschließend informierten noch 5 Firmen über ihre Möglichkeiten, Erfahrungen und technische Ausstattung zur Realisierung von Laserscannerbefliegungen.

SAR, Laserscanning und DHM, Vergleiche und Aspekte

Am letzten Tag des Workshops wurden die beiden Aufnahmeverfahren hinsichtlich ihres Genauigkeitspotenzials und der Wirtschaftlichkeit verglichen. DOWMANN, I. stellte die Ergebnisse von vergleichenden Untersuchungen im Testgebiet Vaihingen vor. Zwischen den Ergebnissen beider Verfahren traten Differenzen auf. Beim Vergleich des „first pulse“ des Lasers mit den Daten der Radarbefliegung konnte eine gute Übereinstimmung der Verfahren (DOM $\sigma = 0,3$ m) erreicht werden. Beim Vergleich des „last pulse“ mit den Radardaten traten

größere Abweichungen (DGM $\sigma = 2,7$ m) auf. Aus diesem relativen Genauigkeitsvergleich können allerdings keine Schlüsse auf die absolute Genauigkeit beider Verfahren gezogen werden.

BRÜGELMANN, R. vom Rijkswaterstaat in den Niederlanden berichtete von umfangreichen Vergleichsmessungen. Dabei wurden ca. 1 900 Punkte durch tachymetrische Messungen bestimmt und mit Messungsergebnissen aus Radar- und Laserscannerbefliegungen verglichen. Die Ergebnisse zeigten, dass bei der Radarbefliegung ein $\sigma = 1,42$ m (nach Beseitigung der Vegetationseinflüsse $\sigma = 37$ cm) und bei der Laserscannerbefliegung ein $\sigma = 12$ cm (nach Beseitigung der Vegetationseinflüsse $\sigma = 4$ cm) erreicht werden konnte. Obwohl die Daten der Radarbefliegung die gestellten Genauigkeitsanforderungen nicht erfüllen konnten, wurde ausdrücklich auch darauf hingewiesen, dass die Radarbefliegung wesentlich preisgünstiger ist.

In der Abschlussdiskussion zum Workshop wurde die Bedeutung beider Verfahren je nach Aufgabenstellung für eine effektive Bereitstellung von Digitalen Höhenmodellen hervorgehoben. Für die weitere Genauigkeitssteigerung dieser Methoden ist es wichtig, noch mehr über die Einflussfaktoren während des Fluges zu erforschen, bessere Filter für die Selektion von Gebäuden oder der Vegetation zu entwickeln und die Selektion von Geländeformlinien („Bruchkanten“) zu ermöglichen. Einen wichtigen Beitrag in diese Richtung könnte die Verbindung von Bildinformationen mit den Höhendaten sein.

Man war sich auch einig, dass es notwendig ist, einheitliche Standards für die Beschreibung der DGM zu entwickeln.

Der Workshop gab genügend Möglichkeiten bei den Erläuterungen der Poster und an den Abenden die in den Vorträgen aufgeworfenen Fragestellungen weiter vertiefend zu diskutieren.

Abschließend sei Professor TOLLEGÅRD und seinen Mitarbeitern für die gute Ausrichtung des Workshops gedankt.

ECKHARDT SEYFERT, Potsdam

Fernerkundung – GIS Workshop in Salzburg am 3./4.7.2001

Im Vorfeld der AGIT, die in diesem Jahr zum 13. Mal an der Universität Salzburg veranstaltet wurde, fand am 3. und 4. Juli 2001 ein Workshop mit dem Titel »Fernerkundung – GIS« (FE/GIS) statt. Die Themen waren der aktuelle Entwicklungsstand neuer Sensoren und – unter dem Aspekt der Auswertung – innovative Analysemethoden. Das Zentrum für Geographische Informationsverarbeitung Salzburg (ZGIS) und der Arbeitskreis ‚Interpretation von Fernerkundungsdaten‘ der DGPF wurden dabei als Veranstalter von Sponsoren aus der Bildverarbeitungsbranche unterstützt.

Einen sehr detaillierten Überblick über bestehende und zukünftige Satellitensysteme gab eingangs Dipl.-Ing. RAINER KALLIANY. Seit ca. 2 Jahren sind Bilddaten neuer, sehr hoch auflösender und multispektraler Sensoren verfügbar. Aus dem Weltraum werden derzeit geometrische Auflösungen bis zu 1 m realisiert, flugzeuggetragene Multispektralscanner liefern digitale Orthophotos mit Bodenaufösungen von 0,15 m. Diese Bilddaten sind sehr detailgetreu und grenzen Objekte exakt gegeneinander ab. Ein großes Problem stellt aber die Auswertung mit automatisierbaren Methoden dar. So führen die statistischen Methoden, die für Landsat TM Bildprodukte quasi standardisiert anwendbar sind, bei extrem hoch aufgelösten Bildern zu unbefriedigenden Ergebnissen. Bessere Resultate liefert eine segmentbasierte Auswertemethodik, die seit ca. einem Jahr auch als kommerzielle Software erhältlich ist.

In der Stadt Tsukuba in Japan wurden kombinierte 1 m (pan) und 4 m (MS) Satellitendaten zur Detektion von Gebäuden und Straßen eingesetzt. Dieselben Daten dienen in Wien dem automatischen Update des vektorbasierten Flächeninformationssystems.

Ein wissenschaftlicher Ansatz der Auswertung von digitalen Orthophotos dient der Verbesserung der geometrischen Genauigkeit von Straßendaten inklusive Straßenmarkierungen im Vektordatensatz der Schweiz.

Klassische Colorluftbilder lassen sich als digitale Orthophotos mit segmentbasierter Auswertesoftware in versiegelte und unversiegelte Flächen unterscheiden, was zukünftig für die Berechnung der grundstücksbezogenen Abwassergebühren eingesetzt werden soll. In Koppelung eines digitalen Höhenmodells mit multispektralen Scannerdaten können neu erbaute Gebäude automatisch erkannt werden, wie an der Stadt Nijmegen gezeigt wurde.

Eine Methode, die eine Segmentierung von hochauflösenden Scannerdaten in homogenere Bildinhalte vor der eigentlichen Klassifikation anwendet, wird erfolgreich zur Detektion von Biotoptypen in den Elbauen verwendet.

Auch geringer auflösende Satellitendaten (5 m pan, 23 m MS) können zur Veränderungsanalyse urbaner Objekte verwendet werden, wie am Beispiel der Stadt Dresden gezeigt wurde.

Mit hyperspektralen Bildern kann anhand sehr enger Spektralbänder ein charakteristisches Reflexionsprofil verschiedener Objekte erstellt werden. Diese Methodik wird eingesetzt, um Stadien der Tagebaurestseen im Raum Leipzig langfristig zu beobachten.

Eine große interaktive Postersession gab den Teilnehmern die Möglichkeit, ihre Erfahrungen in persönlichen Gesprächen miteinander auszutauschen.

Zukünftige Entwicklungen segmentbasierter Bildauswertungssoftware sind sehr vielversprechend. So verfolgt ein Ansatz die automatische Erkennung von Kanten zur Klassifikationsverbesserung geradlinig abgegrenzter Objekte wie z.B. Straßen und Gebäude.

Neben den unumstrittenen Vorteilen der neuen Bildprodukte und Auswertemethoden wurde von den Teilnehmern allerdings kritisch angemerkt, dass eine deutliche Preissenkung sowohl für die Bilddaten als auch für die Auswertesoftware gewünscht ist, um so einer großen Zahl von Nutzern und Anwendern den Einsatz zu ermöglichen.

Den Abschluss des Workshops und die gleichzeitige Eröffnung der AGIT 2001 stell-

te ein Vortrag von Prof. MANFRED EHLERS dar, der ebenso spritzig wie informativ die bestehenden Probleme der GIS Anwender bei der Integration von Fernerkundung vortrefflich auf den Punkt brachte.

Als ein Resümee kann das sehr positive Urteil aller Teilnehmer festgehalten werden, das die Veranstalter, namentlich das Team um Dr. THOMAS BLASCHKE, PETER ZEIL und STEFAN LANG dazu bewegen sollte, diesen FE/GIS Workshop im Vorfeld der AGIT im nächsten Jahr erneut ins Programm aufzunehmen.

MATTHIAS MÖLLER, Vechta

2. Internationales Symposium »Remote Sensing of Urban Areas«

Am 22. und 23. Juni 2001 fand in der Universität Regensburg das 2. Internationale Symposium „Remote Sensing of Urban Areas“ statt. Nach der ersten Konferenz im Jahr 1997 wurde auch diese wieder von PD Dr. CARSTEN JÜRGENS ausgerichtet.

Nach der Begrüßung durch Vertreter der Universität und Stadt Regensburg hieß Prof. Dr. JÖRG ALBERTZ als Mitglied des Vorstandes der DGPF die Teilnehmer willkommen. Ein Grußwort der Europäischen Kommission wurde durch Dr. NIALL McCORMICK vom Direktorat des Space Application Institute, General Joint Research Center überbracht, bevor der Konferenzleiter die Tagung offiziell eröffnete.

Die erste Sitzung befasste sich mit dem Monitoring des **urbanen Wachstums**. So wurden multitemporale Satellitenbilder des Landsat TM verwendet, um das Wachstum von Istanbul über einen Zeitraum von 14 Jahren zu beobachten. Eine ähnliche Untersuchung über eine Zeitspanne von 3 Jahren wurde auch für die Stadt Wien durchgeführt. Ebenfalls eine Serie von Landsat-Aufnahmen wurde für die Entwicklung der Region um den Pearl River in China ausgewertet. Ein Modell, das das Städtewachstum in der Region Santa Barbara prognostiziert, basiert auf einer Kopplung von Fernerkun-

dungsdaten mit sozio-ökonomischen Daten.

Das **Städtewachstum unter ökologischen Aspekten** mit Satellitenbildern wurde für die Region Phoenix auf unterschiedlichen Maßstabsebenen vollzogen. In einem Projekt wurde ein V-I-S-Modell (Vegetation-Impervious-Surface Soil) entwickelt, mit dessen Hilfe urban-ökologische Parameter abgeschätzt werden können. Eine weitere Studie zur Umweltökologie befasste sich mit der Ermittlung von Grünräumen in der Stadt Wien mit Zeitreihen von Fernerkundungsdaten.

Die zweite Sitzung mit dem Titel **Städtewachstum** wurde mit einem Beitrag zur Situation in der Stadt Alexandria eröffnet. In der indischen Stadt Trichirapelli wurden die Änderungen der Stadtstrukturen über einen Zeitraum von 65 Jahren mit Luftbildern und mit Bildern des IRS-IC dokumentiert. Die Sitzung endete mit einem Vortrag, der das Monitoring von Städtewachstum mit einer Kombination von Landsat (MS) und Spot (PAN) beschrieb.

Die Bilddaten des **Scanners High Resolution Stereo Camera-Airborne (HRSC-A)** waren weiterhin Thema einer Sitzung. Sehr interessante Möglichkeiten ergeben sich durch die Intranetaufbereitung der Daten, die effiziente Erfassung im Katasterwesen und die 3D-Darstellung, erläutert am Beispiel der Stadt Osnabrück. Technik und Funktion der HRSC-A und der neuen HRSC-AX wurden vom Entwickler der Kamera vorgestellt. Ein Vortrag beschäftigte sich mit der automatischen Erkennung von urbanen Objekten. Die Sitzung wurde abgeschlossen mit einer Demonstration, wie die HRSC-A-Daten zur Aktualisierung von Straßen- und Navigationsdaten benutzt werden können.

Auch Bildprodukte des Sensors **Ikonos** standen im Mittelpunkt einer Sitzung. Ein wissenschaftlicher Auswerteansatz kombiniert die hochauflösenden Ikonos-Daten (PAN) mit Landsat (MS). In Gombe, Nigeria, wurden verschiedene Haustypen über unterschiedliche Dachkonstruktionen und -materialien anhand von Ikonos-Bilddaten klassifiziert. Eine umfassende Qualitätsanalyse und Untersuchung zur Klassifikation

von Ikonos-Bilddaten mit zwei Bildverarbeitungssystemen wurde abschließend präsentiert.

Die Sitzung mit **Spezialanwendungen** startete mit einem Highlight, der Auswertung von hyperspektralen Daten des australischen Sensors Hymap. Im zweiten Vortrag wurde mit historischen Luftbildern und einer archäologischen GIS-Fachschale das alte Rom rekonstruiert. Die Sitzung wurde abgeschlossen mit einem Projekt, in dem Ikonos- und Landsat-Bilddaten der Bucht von Tokyo kombiniert wurden, um die Gefährdung von Gebäuden bei Erdbeben abzuschätzen.

Dynamische Stadtentwicklungen waren das Thema einer Sitzung, in der eben dieses Phänomen für die Städte Bratislava und Istanbul über einen Zeitraum von jeweils ca. 50 Jahren nachvollzogen wurde. Eine vergleichende Studie anhand der Städte Wien, Belgrad und Shanghai bildete den Abschluss.

Mit der **Ableitung von Höhe und Dichte** befassten sich zwei Vorträge. So wurden SAR-Interferometrie- und HRSC-A-Bilddaten benutzt, um auf verschiedenen Maßstabsebenen 3D-Modelle für Telekommunikationsanwendungen abzuleiten. Am Beispiel von Cardiff wurde gezeigt, wie mit Höhendaten eines Laserscanners Wohn- und Industriegebiete rekonstruiert werden können.

Ein wichtiges Thema ist die automatische **Straßenextraktion**. Vorgestellt wurde in dieser Sitzung zunächst eine Methode, die in Triest erfolgreich eingesetzt wurde. Ein kontextbasierter Ansatz zur Objektextraktion nutzt neue Segmentierungsalgorithmen. Fuzzylogik-Methoden werden zur Extraktion urbaner Gebiete verwendet, dargestellt am Beispiel der Stadt Los Angeles.

Auch **Radardaten** werden zum Monitoring urbaner Regionen verwendet. In Berlin wurde aus einer Kombination von ERS und KVR-Bildern die Versiegelung abgeleitet. Eine langfristige Betrachtung mit interferometrischen SAR-Daten wurde am Beispiel der Städte Cardiff und Bristol vorgestellt und mit einer Hauptkomponentenanalyse von ERS-Daten konnten die Veränderun-

gen der Städte Neapel und Göteborg nachvollzogen werden.

Informelle Siedlungen waren das Thema einer weiteren interessanten Sitzung. Es ist besonders schwierig, für diesen Siedlungstyp Daten zu erheben. Wie es mit einer Kombination von Spot- und ERS-Bilddaten bewerkstelligt werden kann, wurde am Beispiel von Dar es Salaam dargestellt. Für Kapstadt wurden Ikonos-Bilder mit segmentbasierter Software zur Erfassung der informellen Siedlungen ausgewertet. In einer Kombination aus Bodenkartierung und Bilddaten verschiedener Sensoren wurde eine Methode zur Detektion ungeplanter Baumaßnahmen vorgestellt.

Die letzte Sitzung widmete sich dem Thema der **thermalen Änderung** in städtischen Gebieten. Anhand von Landsat TM-Daten konnte für Berlin für die 10 Jahre seit der Wende eine starke thermale Veränderung in einigen Gebieten festgestellt werden. In Tel Aviv werden Thermalbilder verwendet, um Frischluftleitbahnen in die Innenstadt zu planen und Wärmeinseln mit ihren verursachenden Faktoren zu erkennen. Am Beispiel der Stadt Lissabon wurde eine Methode zur Detektion von Wärmeflächen vorgestellt.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass vier Jahre zwischen zwei Tagungen in dem sehr dynamischen Gebiet der Fernerkundung eine lange Zeitspanne ist, gerade vor dem Hintergrund der neuen, hochauflösenden Sensoren und Systeme. Entsprechend viele neue und interessante Forschungsergebnisse konnten einem interessierten Fachpublikum von 125 Personen aus insgesamt 20 Ländern präsentiert werden.

Sehr gelungen war auch bei dieser Konferenz wieder die Kopplung der Tagung an eine Ausstellung. Dort wurden aktuelle Softwareentwicklungen aus dem Bereich der Bildverarbeitung und neue Bildprodukte von Satellitenbetreibern vorgestellt.

Die große Resonanz und die sehr qualifizierten Fachbeiträge lassen hoffen, dass auch die beiden kommenden Tagungen im November 2001 in Rom und im Juni 2002 in Istanbul, die sich einer ähnlichen Thematik widmen, ein ebenso großer Erfolg werden, wie es diese Tagung nach einhelliger

Meinung gewesen ist. Zu danken bleibt neben den engagierten Vortragenden und Teilnehmern besonders dem Veranstalter, Herrn Dr. CARSTEN JÜRGENS, der eine hervorragend organisierte Konferenz mit einem unterhaltsamen, bayerisch geprägten Rahmenprogramm in Szene gesetzt hat.

MATTHIAS MÖLLER, Vechta



Neuer internetbasierter Geoinformatik-Lehrgang am FZG Vechta

In den letzten Jahren ist der Bedarf an Fachleuten für Geographische Informationssysteme (GIS) in Wirtschaft und Verwaltung stark gestiegen. Vor allem Naturwissenschaftler und Ingenieure mit IT-Zusatzqualifikationen im Bereich der geographischen Informationsverarbeitung sind derzeit auf dem Arbeitsmarkt gefragt.

Seit Februar 2001 bietet das Forschungszentrum für Geoinformatik und Fernerkundung der Hochschule Vechta den Weiterbildungslehrgang *UNIGIS professional* an. Die einjährige internetgestützte Geoinformatik-Schulung zum Erwerb praxisorientierter GIS-Kenntnisse wird in Zusammenarbeit mit der Universität Salzburg im Rahmen des 1993 gegründeten internationalen Universitätsnetzwerkes UNIGIS durchgeführt. UNIGIS ist damit nun auch im Norden Deutschlands mit einem Studienzentrum präsent.

Das FZG, das von Prof. Dr. MANFRED EHLERS geleitet wird, ist ein interdisziplinär und hochschulübergreifend arbeitendes Zentrum zur wissenschaftlichen Forschung und Weiterbildung. Die Arbeitsschwerpunkte liegen in der Entwicklung und Anwendung von Methoden und Werkzeugen der Geoinformatik, Fernerkundung und Bildverarbeitung, dabei wird besonders auf

landschaftsökologische und raumplanerische Themenbereiche Bezug genommen. Zwischen den Mitarbeitern der Geoinformatik und Fernerkundung an der Hochschule Vechta und an der Universität Salzburg besteht schon seit längerer Zeit eine enge fachliche Zusammenarbeit. Mit der Unterzeichnung eines Kooperationsvertrages zwischen beiden Partnern werden UNIGIS-Lehrgänge nun einem breiten Teilnehmerkreis zugänglich gemacht. Es ist geplant, die Zusammenarbeit auf weitere Lehrangebote, die Erstellung praxisorientierter Lehreinheiten und die Abhaltung von Seminaren zu verschiedenen Fragestellungen der geographischen Informationsverarbeitung auszudehnen.

Umfassende praktische Erfahrungen im Umgang mit Geographischen Informationssystemen und die sofortige Umsetzbarkeit des erworbenen Wissens stehen im Mittelpunkt des UNIGIS-Lehrganges. *UNIGIS professional* ist kein wissenschaftlicher Studiengang, sondern dient der beruflichen Weiterbildung nach dem Prinzip des „lebenslangen Lernens“. Durch den hohen Anteil von Selbstlernmodulen können Teilnehmer ohne Veränderung ihres Lebensumfeldes eine universitäre Schulung absolvieren. Internetbasierte Lehreinheiten ermöglichen es, sich Wissen in flexibler Zeiteinteilung von Zuhause aus individuell anzueignen. Die UNIGIS-Lehrmodule sind multimedial aufbereitet, Online-Glossare erklären wichtige Fachbegriffe und Links verweisen zu weiterführenden Quellen im WWW. Interaktive Übungen helfen außerdem bei der eigenen Lernzielkontrolle; am Ende jedes Moduls steht eine schriftliche Prüfung.

Das neue Studienzentrum bietet allen Teilnehmern die Möglichkeit, die Einführungsveranstaltung sowie Seminartage in Vechta zu besuchen. Durch Mitarbeiter des FZG erhalten sie eine individuelle Lernberatung sowie Unterstützung bei technischen und inhaltlichen Problemen. Über e-mail, Mailinglisten und in Chatrooms kann der Kontakt zu Lehrenden und anderen Teilnehmern aufgenommen werden.

Aber auch der persönliche Erfahrungsaustausch ist gewährleistet: So werden loka-

le Lerngruppen gebildet und bei Bedarf Treffen mit den Mitarbeitern im UNIGIS Studienzentrum organisiert. Selbstverständlich steht auch UNIGIS Salzburg als Ansprechpartner, insbesondere bei Fragen zu Einschreibung, Lehrgangsorganisation, Leistungsbeurteilung und Abschluss bzw. bei Fragen zu den Modulen zur Verfügung.

Der Lehrgang richtet sich insbesondere an Geographen, Biologen, Agrar- und Forstwissenschaftler, Vermessungsingenieure, Landespfleger, Landschaftsarchitekten und Raumplaner sowie an Absolventen anderer natur- bzw. ingenieurwissenschaftlicher Fachrichtungen, in denen raumbezogene Fragestellungen grundlegend für die Berufstätigkeit sind.

UNIGIS professional kann im Studienzentrum Vechta als berufsbegleitender Lehrgang absolviert werden. Arbeitslose haben ferner die Möglichkeit, den Lehrgang als ganztägiges Selbststudienprogramm zu durchlaufen, sie können vom Arbeitsamt eine Förderung erhalten. Der Einstieg erfolgt je nach Zahl der Interessenten drei- bis viermal pro Jahr. Die Schulung steht Bewerbern ab dem 20. Lebensjahr mit Hochschulreife bzw. einschlägiger Erfahrung im Bereich der geographischen Informationsverarbeitung und einem eigenen PC mit Internetanschluss offen. Die Lehrgangsgebühr beträgt € 3488,40.

Die Maßnahme endet mit dem anerkannten Zertifikat „Akademische/r Geoinformatiker/in“, das den Absolventen ein weites

Tätigkeitsfeld im Geoinformatik-Bereich (Geographische Informationssysteme, Umweltdatenbanken, Fernerkundung, Navigationssysteme etc.) eröffnet.

Anfragen und Anmeldungen bitte an:
UNIGIS Studienzentrum Vechta
FZG – Hochschule Vechta
PF 1553, 49364 Vechta, Tel.: 04441-15478,
Fax: 04441-15464, e-mail: info@unigis.de,
http://www.unigis.de

EARSeL-Bureau neu gewählt

Die 25. Generalversammlung der EARSeL – *European Association of Remote Sensing Laboratories* –, die gleichzeitig mit dem 21. Symposium vom 14. bis 16.5.2001 in Marne-la-Vallée (Paris) durchgeführt wurde, hat ein neues Büro gewählt:

- Neuer Leiter ist Prof. Dr. EBERHARD PARLOW, Universität Basel/CH
- Stellvertretender Leiter: Prof. Dr. PAUL MATHER, University of Nottingham/UK
- Generalsekretär: Prof. Dr. RUDI GOOSSENS, University of Gent/B
- Schatzmeister: Dr. RAINER REUTER, Universität Oldenburg
- Ost-West-Verbindungen: Dr. TOMAS BENES, UHUL Forest Management/CZ

Quelle: EARSeL Newsletter Juni 2001 – No.46 und EARSeL-Sekretariat, Mme. Madeleine Godefroy, 2 av Rapp, F-75340 Paris Cedex 07, e-mail: earsel@meteo.fr

Hochschulnachrichten

Technische Universität Wien

Dipl.-Ing. **BALÁZS MELYKUTI** wurde am 19.01.2001 an der Fakultät für Technische Naturwissenschaften und Informatik der Technischen Universität Wien mit der Dissertation „*Videometric Measurement System for Surface Determination*“ zum Dr.-techn. promoviert. Referenten waren Prof. Dr. KARL KRAUS und Prof. Dr. JOSEF JANSKA.

Autorreferat

Die effiziente und robuste Bestimmung der dreidimensionalen Form von menschlichen Körperteilen ist immer noch ein wichtiges Problem im medizinischen Bereich. Das Modellieren von Teilen der Oberfläche des menschlichen Körpers wird für die Operationsplanung, für Operationsüberwa-

chung und postoperative Überprüfung gebraucht.

In der medizinischen Praxis wurden verschiedene Technologien für dreidimensionale Messungen verwendet. Bekannte Methoden sind CT (Computer Tomographie) und MR (Magnetresonanz-Bilder). Die photogrammetrische Methode ist eine interessante Alternative. Sie verwendet weder schädliche Strahlung, noch benötigt sie teure technische Ausstattung, ist aber auf jene Fälle beschränkt, wo nur die Körperoberfläche gebraucht wird. Die Nachteile der traditionellen Photogrammetrie sind einerseits die lange Zeit zwischen Bilderfassung und fertigem 3D-Modell und andererseits der Bedarf an Fachleuten. In letzter Zeit bietet die digitale Photogrammetrie Möglichkeiten für schnelle, unkomplizierte, billige und trotzdem genaue Messungen.

Die Vorteile der digitalen Photogrammetrie ausnützend wurde ein System entwickelt, das Niedrigpreiskomponenten verwendet. Das System besteht aus vier Kameras und zwei Texturprojektoren, die auf einem Rahmen befestigt sind und einem PC mit Frame-Grabber-Karte. Das System wurde in erster Linie für Untersuchungen des menschlichen Gesichts aufgebaut, wobei zwei Stereopaare mit vertikaler Basis die linke und rechte Gesichtshälfte abdecken. In der Mitte ergibt sich eine kleine Überlappung.

Für die Orientierung wurde eine automatische Methode entwickelt, welche ein einfaches Kontrollpunktfeld verwendet und ohne Benutzereingriff läuft. Für die Texturerzeugung auf der Objektoberfläche wurden spezielle Zufallsmuster untersucht. Diese Muster enthalten tief- und hochfrequente Anteile. Erstere sind gut für das Konvergenzverhalten des Matchings und letztere erhöhen die Matching-Genauigkeit. Das verwendete Matching-Verfahren für die Oberflächenbestimmung ist eine intensitätsbasierte, globale Methode, die CHRISTIAN ÖHRENER in seiner Dissertation entwickelt hat (CHR. ÖHRENER, A Similarity Measure for Global Image Matching Based on the Forward Modeling Principle. Dissertation an der TU Wien, 1999; PFG, Heft 6/1999,

S. 397/398). Die Genauigkeit des Systems wurde mit verschiedenen Objekten getestet, von geometrisch einfachen Formen bis hin zu ganz komplexen, wie dem Gipsmodell eines menschlichen Gesichts. Die Eignung für die Praxis wurde am lebenden Modell erprobt.

Über ein benutzerfreundliches Interface kann das System leicht bedient werden, auch durch Personal, das keine photogrammetrische Erfahrung besitzt. Alle komplizierten Prozesse laufen im Hintergrund ab, wie etwa der Bündelblockausgleich für die Kalibrierung und Orientierung der Kameras oder die Matching-Prozedur. Die mit diesem System erreichbare Genauigkeit liegt sicher innerhalb 1 mm, was der anfangs gestellten Forderung entspricht. Wenn auch nicht in Echtzeit, so kann das dreidimensionale Modell doch in einer für den Mediziner akzeptablen Zeit erhalten werden (ca. 15 min mit PC 100 MHz). Das Ergebnis braucht im Allgemeinen keine Nachbearbeitung und kann unmittelbar der Software für Operationsplanung und Überprüfung übergeben werden.

Technische Universität Wien

Dipl.-Ing. **DIETMAR LEGENSTEIN** wurde am 17. Mai 2001 an der Fakultät für Technische Naturwissenschaften und Informatik der TU Wien mit der Dissertation „Objektrekonstruktion aus perspektiven Bildern unter Einbeziehung von Umrisslinien“ zum Doktor der technischen Wissenschaften (Dr. techn.) promoviert.

1. Gutachter: O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. **KARL KRAUS**,

2. Gutachter: O.Univ.Prof. Mag.rer.nat. Dr.techn. **HELMUT POTTMANN**

Kurzfassung

Die Hauptaufgabe der Photogrammetrie ist es, aus analogen oder digitalen Bildern dreidimensionale Objekte – Größe, Form, Lage oder geometrische Abstände – zu rekonstruieren. Dazu werden zunächst aus Fotos mit Hilfe von bekannten „Gebilden“ die Aufnahmeorte und die Orientierungsparameter

bestimmt. In erster Linie wird die Objektrekonstruktion mittels Verknüpfungspunkten – oder auch über kurvenförmige Merkmale – gelöst. In dieser Arbeit hingegen soll die Objektrekonstruktion über Umrisslinien diskutiert werden. Die Einbeziehung von Umrisspunkten bei der Objektrekonstruktion ist dann von Bedeutung, wenn am Objekt nur wenige Punkte gemessen werden können und das Einmessen eines jeden weiteren Punktes mit erheblichem Mehraufwand verbunden wäre. In der digitalen Photogrammetrie bietet sich an, Umrisslinien automatisch zu detektieren, jedoch müssen diese Linien als Umrisse identifiziert und den entsprechenden Objekten zugeordnet werden. Eine Objektrekonstruktion ausschließlich über Umrisslinien stößt bei Flächen mit Eindellungen an ihre Grenzen, jedoch auch hier liefert sie wertvolle Beiträge.

Im ersten Teil der Arbeit wird das mathematische und photogrammetrische Gebäude, das für die Lösung dieser Aufgabe nötig ist, entwickelt; der zweite Teil beschäftigt sich mit der Implementierung in das Programmpaket ORIENT. Abgerundet wird diese Arbeit durch ein Musterbeispiel (Vermessung des Wiener Fernwärmeturms), an dem der Einsatz der entwickelten Theorie ausführlich gezeigt wird.

Technische Universität Wien

Dr.-Ing. **STEPHAN WINTER** habilitierte sich am 19. Juni 2001 und erhielt die *venia legendi* im Fach Geoinformation an der Technischen Universität Wien. Seine Habilitationsschrift »*Unified Behavior of Vector and Raster Representation*« stellt seine Arbeiten über konsistentes Verhalten topologischer Operatoren auf verschiedenen Datenrepräsentationen zusammen.

Die einzelnen Beiträge behandeln als Erstes eine Theorie für hybride Vektor-/Rasterrepräsentationen in GIS, die sich auf topologisches Verhalten stützt. Topologie als Kriterium für zusammengeführte Repräsentationen zu wählen macht Sinn, denn einerseits ist das Verhalten topologischer Operationen in Vektor- und Rasterrepräsentation

qualitativ unterschiedlich, andererseits sind die Unterschiede im Verhalten metrischer Operationen eher eine Funktion des Maßstabs (der Rasterauflösung) als der Diskrettheit dieser Repräsentation.

In einer zweiten Gruppe von Beiträgen werden deshalb die Einflüsse des Maßstabs und der Schärfe der Grenzziehung von Objekten auf das Verhalten topologischer Operatoren untersucht. Insbesondere wird gezeigt, wie Unsicherheit oder generalisierte Formen von Objekten mit dreiwertiger Logik in den topologischen Operatoren modelliert werden können, was zu unsicheren topologischen Relationen führt.

Im dritten Teil der Beiträge wird die experimentelle Methode der übrigen Beiträge genauer betrachtet. Es wird die Möglichkeit, einen Interoperabilitätsstandard des OpenGIS-Konsortiums mit algebraischen Methoden in einer funktionalen Programmiersprache zu beschreiben untersucht und dies mit üblichen UML-Ansätzen verglichen.

Gutachter im Habilitationsverfahren waren die Professoren **ANDREW U. FRANK** (Wien), **MICHAEL WORBOYS** (Keele) und **PETER FISHER** (Leicester).

Die Habilitationsschrift ist als Heft 20 in der Schriftenreihe des Instituts für Geoinformation der TU Wien erschienen und kann dort bestellt werden.

Hochschule Vechta

Dipl.-Inform. **THOMAS H. KOLBE** aus Recklinghausen wurde am 17. Mai 1999 am Institut für Umweltwissenschaften mit der Dissertation „Identifikation und Rekonstruktion von Gebäuden in Luftbildern mittels unscharfer Constraints“ zum Dr. rer. nat. promoviert. Die Dissertation ist 2000 im Shaker Verlag Aachen unter der ISBN 3-8265-7454-0 erschienen.

Referent: Prof. Dr. rer. nat. **LUTZ PLÜMER**, Universität Bonn

Korreferenten: Prof. Dr. rer. nat. **ARMIN B. CREMERS**, Universität Bonn und

Prof. Dr.-Ing. **MANFRED EHLERS**, Hochschule Vechta

Autorreferat: In der Arbeit wird ein neues Verfahren zur automatischen Erkennung und 3D-Rekonstruktion von Gebäuden in Luftbildern vorgestellt. Das Konzept basiert auf der Verwendung eines komponentenbasierten, generischen Gebäudemodells, das die Repräsentation und Unterscheidung einer Vielzahl verschiedener Gebäudetypen erlaubt. Das Verfahren ist in der Lage, Gebäude im Bild zu identifizieren, zu lokalisieren und anschließend als dreidimensionale Modelle zu rekonstruieren. Der Fokus der Dissertation liegt auf der Entwicklung einer geeigneten Repräsentation von Gebäude-modellen, die die Anwendung effizienter Suchverfahren erlaubt, sowie der Konstruktion eines Bewertungsschemas, das trotz Störungen in den Bilddaten Gebäude vom Bildhintergrund unterscheiden kann und gleichzeitig die Klassifikation erkannter Gebäude in verschiedene Gebäudetypen ermöglicht.

Da bei der Suche nach Gebäuden in Luftbildern a priori nicht bekannt ist, an welchen Positionen im Bild welche Gebäudetypen in welcher Ansicht abgebildet sind, werden zunächst verschiedene Hypothesen für möglicherweise abgebildete Gebäude und deren zweidimensionale Ausprägungen im Bild (Ansichten) generiert. Die Suche nach diesen Gebäudeansichten im Bild gestaltet sich aus drei Gründen als schwierig: Erstens sind die Ausdehnungen und Winkel der Ansichten auf Grund der unbekanntem Gebäude-maße und -positionen unbestimmt, d. h. das einzusetzende Suchverfahren kann nicht einfach nach Gebäudeteilen mit bestimmten Merkmalswerten im Bild suchen. Zweitens muss die Übereinstimmung der Hypothesen mit dem Bild bewertet und bei Vorliegen verschiedener Hypothesen die zutreffende ausgewählt werden. Letzteres wird dadurch erschwert, dass die Hypothesen unterschiedlich komplex sein können und damit ein einfacher Vergleich ausscheidet. Drittens wird der gesamte Prozess durch den Umstand verkompliziert, dass Rauschen, Verdeckungen und ungünstige Kontraste dazu führen, dass bestimmte Gebäudeteile im Bild verfälscht oder überhaupt nicht beobachtbar sind.

Zur Lösung dieser Probleme werden sowohl die Luftbilder als auch die Gebäudeansichten in relationale Strukturen zerlegt, die sich aus Punkten-, Linien- und Flächenmerkmalen und den dazwischen bestehenden geometrischen und topologischen Relationen zusammensetzen. Die Suche nach einem Gebäude entspricht dann der Suche nach einem Subgraph-Isomorphismus des Gebäudeansichtsgraphen mit dem größeren Graphen der gesamten Luftbildmerkmale (Relational Matching). Zur Lösung dieses kombinatorischen Problems werden Constraint-Techniken eingesetzt, die mit den Mitteln des Constraint Logic Programming effizient realisiert werden. Zur Berücksichtigung der Effekte von Bildstörungen werden die auf kategorischen Entscheidungen basierenden Constraint-Techniken so erweitert, dass explizit zwischen Unbeobachtbarkeit und Unschärfe unterschieden wird.

Die Bewertung der Ähnlichkeit von Gebäudehypothesen und Bilddaten wird über ein informationstheoretisches Maß realisiert, das eine Maximum Likelihood-Schätzung im probabilistischen Sinne garantiert. Zur Bestimmung der wahrscheinlichsten Gebäudehypothese wird das Verfahren der minimalen Beschreibungslänge eingesetzt. Dazu werden in dieser Arbeit Codierungsverfahren entwickelt, die die relational repräsentierten Gebäudehypothesen so kompakt codieren, dass eine hinreichende Trennschärfe erreicht wird, um selbst sehr ähnliche Gebäude sowohl voneinander als auch vom Bildhintergrund diskriminieren zu können. Wesentliche Vorteile des Konzepts bestehen darin, dass die Interpretation auf einer wahrscheinlichkeitstheoretischen und damit objektiven Basis stattfindet und das Verfahren ohne frei zu wählende Parameter auskommt; alle festzulegenden Wahrscheinlichkeiten werden entweder analytisch bestimmt oder anhand von Trainingsdaten geschätzt.

Hochschule Vechta

Dipl.-Inform. **GERHARD GRÖGER** aus Wesseling wurde am 14. Mai 1999 am Institut für Umweltwissenschaften mit der Dissertation „Geometrisch-topologische Konsistenz in Geo-Informationssystemen“ zum Dr. rer. nat. promoviert.

Referent war Prof. Dr. rer. nat. **LUTZ PLÜMER**, Institut für Kartographie und Geoinformation der Universität Bonn,

Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. D. **MORGENSTERN**, Institut für Kartographie und Geoinformation der Universität Bonn und Prof. Dr.-Ing. M. **EHLERS**, Institut für Umweltwissenschaften der Hochschule Vechta.

Die Arbeit ist 2000 unter dem Titel „Modellierung raumbezogener Objekte und Datenintegrität in GIS“ im Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, erschienen (ISBN: 3-87907-354-6).

Zusammenfassung: Beim Einsatz eines Geo-Informationssystems (GIS) stellt die Ersterfassung und Fortführung der Daten den größten Kostenfaktor dar. Die Sicherung und Aufrechterhaltung der Integrität solcher Datenbestände ist – gerade im Zeitalter der Interoperabilität und entstehender Märkte für Geodaten – eine immer wichtigere, aber auch zunehmend komplexere Aufgabe. Ein wichtiger Aspekt der Datenintegrität ist die Konsistenz zwischen Geometrie und Topologie, die grundlegende Voraussetzung für zahlreiche GIS-Anwendungen ist. Beispiele hierfür sind die amtliche Statistik und das Liegenschaftskataster (ALK), aber auch das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS). Die meisten kommerziellen GIS erheben zwar den Anspruch, die geometrisch-topologische Konsistenz zu sichern; ob sie dies jedoch tatsächlich leisten, ist nicht nachweisbar, da die verwendeten Verfahren nicht vollständig dokumentiert und nicht transparent sind. Andererseits sind Vorschläge aus den Bereichen der Forschung oder Standardisierung nachweisbar fehlerhaft.

Diese Defizite existierender Ansätze werden in der vorliegenden Dissertation behoben.

Sie stellt ein Verfahren vor, das die geometrisch-topologische Konsistenz flächenhafter Objekte nachweisbar zusichert. Ausgangspunkt ist das grafentheoretische Konzept der Landkarte, das die in GIS verwendeten Datenstrukturen verallgemeinert und somit die geeignete Grundlage für ein allgemeines Verfahren zur Integritätsüberprüfung bietet.

Das vorgestellte Verfahren besteht aus Integritätsbedingungen (Axiomen) für Landkarten, die einerseits nachvollziehbar und somit einer Verifikation zugänglich, andererseits durch Anwendung geometrischer Standardmethoden effektiv überprüfbar sind. Ein neuartiger Ansatz zur Überprüfung der Überlagerungsfreiheit von Flächen sichert die Effizienz des Verfahrens zu: es ist asymptotisch optimal im Sinne der Komplexitätstheorie. Dadurch ist eine wesentliche Voraussetzung für die Akzeptanz des Verfahrens bei Anwendern geschaffen.

Das Verfahren ist in mehrfacher Hinsicht allgemein. Zunächst ist es anwendungsunabhängig und auf die meisten Datenstrukturen kommerzieller GIS anwendbar. Phänomene wie Enklaven, das Relief, dreidimensionale Stadtmodelle und Hierarchien von Objekten werden durch natürliche Erweiterungen abgedeckt, ebenso wie unscharfe Daten. Diese einzelnen Komponenten können nach Art eines Baukastens beliebig kombiniert werden; ein Nutzer kann sich so der Bausteine bedienen, die für seine Anwendung relevant sind.

Die praktische Umsetzbarkeit des Verfahrens wird durch die prototypische Entwicklung eines Werkzeugs demonstriert, das auf Daten des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems anwendbar ist und Fehler in diesen Datenbeständen aufdeckt.

Humboldt-Universität Berlin

Von der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät II der Humboldt-Universität Berlin wurde Frau Dipl.-Ing. (FH) **ANDREA HOFFMANN** am 10. Mai 2001 zum

Dr. rer. nat. promoviert. Das Thema ihrer Dissertation lautet »*Neue Ansätze zur Auswertung und Klassifizierung von sehr hochauflösenden Daten – Methoden der Segmentierung, der hierarchischen Klassifizierung und der per-Parcel-Methode mit Daten der Digitalen Kamera HRSC-A und ihre Anwendbarkeit für die Aktualisierung topographischer Karten*«. Gutachter waren Prof. Dr. ENDLICHER, Prof. Dr. PEYKE und Prof. Dr. NEUKUM. Das Gesamturteil lautete »magna cum laude«. Die Dissertation ist im Internet zugänglich unter: <http://docho.st.rz.hu-berlin.de/dissertationen/hoffmann-andrea-2001-05-10/>.

Zusammenfassung: Auf dem Luftbildsektor vollziehen sich seit einigen Jahren grundsätzliche Veränderungen. Digitale flugzeuggetragene Kamerasysteme und hochauflösende Satellitensysteme bieten neue Potenziale der Datenakquise und -auswertung. Diese digitalen Datensätze werden in absehbarer Zeit das herkömmliche Luftbild ersetzen und Kartographie, Photogrammetrie und Fernerkundung erheblich verändern. Die neue Generation von digitalen Kameras wird zwei zentrale Bereiche der Kartographie einschneidend beeinflussen: Die Orthokartenherstellung und die Kartenaktualisierung. Der Bedarf aktueller Geobasisdaten macht Orthobilder besonders für Geoinformationssysteme interessant. Bisher standen als Basisdaten für Orthobildkarten großer Auflösung (> 1:10000) lediglich Luftbilder zur Verfügung. Es wird gezeigt, dass die digitalen Daten der neuen Kamerageneration zur Erstellung von Orthobildkarten operationell einsetzbar sind. Durch die automatisierte Prozessierung werden sie den Anforderungen an schnelle aktuelle Kartenprodukte gerecht, mit ihrer hochgenauen Navigation bieten die digitalen Systeme die automatisierte Erstellung geometrisch sehr genauer Datensätze, die mit herkömmlichen Mitteln nur sehr aufwändig erreicht werden könnten. Ein Vergleich mit Luftbildern zeigt und bewertet die Unterschiede beider Aufnahmesysteme.

Untersucht wurden Datensätze der digitalen Kamera HRSC-A des DLR Adlershof.

Mit der HRSC-A (High Resolution Stereo Camera – Airborne) und der speziell für die Prozessierung dieser Daten entwickelten Software steht den Geoinformationsnutzern erstmals ein operationelles System zur Verfügung, das vollständig digital und vollautomatisch hochauflösende Orthobilddaten produziert. Die Pixelauflösung liegt zwischen 10 und 40 cm (Flughöhe von 2500 bis 10000 m). Als vorteilhaft für die Analyse erweist sich die gleichzeitige Verfügbarkeit von hochauflösenden panchromatischen und multispektralen Datensätzen, die Verfügbarkeit eines hochauflösenden Geländemodells (x, y: 50 cm bzw. 1 m, z: 10 cm) und die hohe Genauigkeit der Datensätze.

Die Arbeit diskutiert die Problematik einer automatisierten Auswertung hochauflösender Daten. Diese Datensätze stellen neue Anforderungen an Auswertungsverfahren. Der Detailreichtum erschwert die Interpretation, gröbere räumliche Auflösungen glätten die Komplexität innerhalb heterogener Landnutzungen (besonders in urbanen Gebieten) und erleichtern so eine automatische Interpretation. Es wird gezeigt, dass „klassische“ Auswertungsmethoden wie pixelbasierte Klassifizierungen (überwacht oder unüberwacht) zur Auswertung der hochauflösenden Daten nur bedingt geeignet sind. Im Rahmen der Arbeit werden zwei neue Ansätze entwickelt und untersucht, die nicht mehr pixelweise, sondern flächenhaft und objektorientiert arbeiten.

Ein per-parcel-Ansatz zeigt gute Ergebnisse bei der Auswertung. Das Verfahren ermittelt zunächst mittels einer unüberwachten Klassifizierung Szenekomponenten in definierten Untereinheiten (parcel), die den Inhalt des Datensatzes repräsentieren. Die klassifizierten Pixel innerhalb der definierten parcel-Einheiten werden anschließend extrahiert und ihr Verhältnis zueinander weiter ausgewertet. Ergebnis ist zunächst die prozentuelle Verteilung der Szenekomponenten in den Einheiten, anschließend werden Zusammenhänge zwischen den vorhandenen Komponenten und der Landoberfläche definiert.

Untersucht wurde ferner ein objektorientierter Ansatz, der die Interpretation von

Einzelobjekten erlaubt. Hierbei wird das Bild in homogene Objekte segmentiert, die die Grundlage für die weitere Analyse bilden. Der diskutierte Ansatz besteht aus zwei Strategien: Mittels multiskalarer Segmentierung wird der Bilddatensatz zunächst in Einheiten strukturiert, verschiedene Maßstabsebenen sind gleichzeitig verfügbar. Grundidee ist die Schaffung eines hierarchischen Netzes von Bildobjekten. Diese gefundenen Einheiten werden anschließend spektral mittels Nearest Neighbour oder wissensbasiert mittels Fuzzy Logic Operatoren klassifiziert. Der Ansatz zeigt überzeugende Ergebnisse bei einer automatisierten Hauserkennung und der Aktualisierung bestehender Vektordatensätze. Die Einteilung der Bilddaten in Segmente, also zunächst eine Abstrahierung der Information vom Einzelpixel zu größeren semantischen Einheiten und die weitere Bearbeitung dieser Segmente erwies sich als sinnvoll. Es wurde ferner gezeigt, dass für die Analyse in städtischen Räumen die Einbeziehung von Oberflächeninformation unbedingt erforderlich ist. Durch die spektrale Ähnlichkeit von Bildelementen bietet die Einbeziehung des Oberflächenmodells die Möglichkeit, mittels einer zusätzlich bekannten Information über die Höhe der Objekte, diese Klassen zu trennen.

Technische Universität Berlin

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Berlin wurde Dipl.-Ing. **MATTHIAS HEMMLEB** am 19. Juli 2001 zum Dr.-Ing. promoviert. Das Thema seiner Dissertation lautet »*Photogrammetrische Auswertung elektronenmikroskopischer Bilddaten*«. Gutachter waren Prof. Dr.-Ing. **JÖRG ALBERTZ**, Prof. Dr.-Ing. **LOTHAR GRÜNDIG** und Prof. Dr. **HANS-GERD MAAS** (TU Dresden).

Zusammenfassung: Die vorgelegte Arbeit dient der Entwicklung eines weitgehend automatisch arbeitenden photogrammetrischen Verfahrens zur räumlichen Auswertung

von rasterelektronenmikroskopischer Bilddaten. Sie umfasst grundlegende Untersuchungen zur Aufnahmegeometrie sowie der Verwendung photogrammetrischer Methoden und Algorithmen aus der Bildverarbeitung. Geeignete Ansätze wurden entwickelt und an die speziellen Anforderungen an die Auswertung im Mikrobereich angepasst. Die Leistungsfähigkeit der darauf basierenden Auswerteverfahren wurde anhand ausgewählter Anwendungsbeispiele demonstriert.

Die photogrammetrische Auswertung von Proben im Mikrobereich weist zahlreiche Besonderheiten auf. Daher werden zunächst grundlegende Probleme der geometrischen Modellierung der Abbildungsverhältnisse am Rasterelektronenmikroskop (REM) diskutiert. Diese umfassen insbesondere die Berücksichtigung der parallelen Abbildungsgeometrie und die Lösung der Orientierungsproblematik. Wegen des Fehlens von Passpunkten im Mikrobereich kamen neben der photogrammetrischen Kalibrierung der verwendeten REM mit geeigneten Kalibrierobjekten auch Methoden zur Selbst- und Simultankalibrierung zur Anwendung. Es wurde ein Bündelansatz mit parallelen Abbildungsgleichungen entwickelt und anhand verschiedener Beispiele getestet. Daneben werden aber auch einfache Verfahren für die Kalibrierung und die Punktbestimmung vorgestellt und hinsichtlich ihrer Genauigkeit untersucht.

Bei der photogrammetrischen Auswertung im Mikrobereich ist zu berücksichtigen, dass die zu vermessenden Proben äußerst unterschiedliche Gestalt aufweisen. Entsprechend wurden flexible Auswertemethoden entwickelt und auf ihre Brauchbarkeit für die jeweilige Fragestellung hin getestet. Für die erfolgreiche Auswertung der Aufnahmen spielt die automatische Bildzuordnung eine entscheidende Rolle. Für die flächenhafte Bildzuordnung konnte auf bestehende Algorithmen auf der Basis der digitalen Bildkorrelation zurückgegriffen werden. Insbesondere die Kleinste-Quadrate-Korrelation liefert bei vielen Anwendungsfällen aus dem Bereich der Materialforschung sehr gute Ergebnisse. Viele Mi-

krstrukturen weisen aber stark kantige Formen mit ungenügender Textur auf. Für diese Proben mussten merkmalsbasierte Zuordnungs- und Auswerteverfahren entwickelt werden. Dazu wurden zunächst Kantenoperatoren auf ihre Brauchbarkeit in Bezug auf die Extraktion von geometrischen Merkmalen von Mikrostrukturen untersucht. Weiterhin erfolgte die Entwicklung von Algorithmen und Verfahren zur Zuordnung der Objektmerkmale (Punkte und Kanten), welche teilweise in die Auswerteverfahren integriert worden sind. Anhand eines einfachen Beispiels einer künstlich hergestellten Mikrostruktur konnte die Vorgehensweise für eine kantenbasierte Auswertung gezeigt werden, deren Resultat ein automatisch rekonstruiertes 3D-Modell der Probe ist.

Neben der Untersuchung von methodischen und Genauigkeitsaspekten stand bei der Entwicklung der Verfahren vor allem die praktische Anwendbarkeit im Vordergrund.

Dabei besitzt die Integration der einzelnen Algorithmen und Verfahrensschritte in einen durchgängigen Auswerteprozess große Bedeutung. Im Rahmen der Arbeit konnte jeweils ein weitgehend automatisiertes sequenzielles Verfahren für die flächenhafte und die merkmalsbasierte Auswertung auf der Basis einzelner Programmmodule realisiert werden.

Die in der Arbeit vorgestellten Ergebnisse zeigen die Flexibilität und das Genauigkeitspotenzial photogrammetrischer Messmethoden im Mikrobereich. Das Verfahren ist unabhängig vom Maßstab des Aufnahmesystems und kann daher für verschiedene Rasterelektronenmikroskope mit Bildern sehr unterschiedlicher Vergrößerung angewendet werden. Einen Hinweis auf die Möglichkeiten, welche sich durch die Anwendung photogrammetrischer Methoden im Mikrobereich ergeben, ist die in der Arbeit vorgestellte Erfassung von Veränderungen der Oberflächentopographie.

Vorankündigungen*

2001

5.–9. November: 22nd **Asian Conference on Remote Sensing (ACRS 2001) in Singapur.** Auskünfte durch: ACRS 2001 Organizing Committee, e-mail: acrs2001@crisp.nus.edu.sg, <http://acrs2001.crisp.nus.edu.sg>

8.–9. November: **FIG & ICA Symposium „Geodetic, Photogrammetric and Satellite Technologies – Development and Integrated Application“** in Sofia, Bulgarien. Auskünfte durch: Prof. Georgi Milev, Tel.: +35-92-893 379, Fax: +35-92-9879 360 e-mail: milev@argo.bas.bg, <http://acstrema.vmei.acad.bg/Sofia2001>

8.–9. November: 1st **IEEE/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fu-**

sion over Urban Areas in Rom, Italien. Auskünfte durch: Paolo Gamba, Dip. Di Eletttronica, Università di Pavia, 27100 Pavia, e-mail: p.gamba@ele.unipv.it, oder: urban_2001@ele.unipv.it, http://tlc.unipv.it/urban_2001

19.–20. November: **International Symposium on Spatial Data Infrastructure (SDI) in Melbourne.** Auskünfte durch: Ian Williamson, Tel.: +61-3-9347 41 28, e-mail: sdi@sunrise.sli.unimelb.edu.au

2002

23.–25. Januar: 4th **International Conference „Fusion of Earth Data“ (EARSeL SIG Workshop) in Sophia Antipolis**, Frankreich. Auskünfte durch: Dr. Thierry Ranchin, Tel.: +33-4-9395 74 53, Fax: +33-4-9395 75 35, e-mail: thierry.ranchin@cenerg.cma.fr, <http://www.data-fusion.org/conf/fourth>

* Vgl. auch: PFG 3/2001, S. 224–225 und 4/2001, S. 308–310

- 21.–26. April: **XII FIG Congress & XV General Assembly in Washington, DC**. Auskünfte durch: Mary Clawson, e-mail: clawson@nima.mil
- 4.–6. Juni: 22nd **EARSeL Symposium and General Assembly: Geoinformation for European-Wide Integration in Prag**, Tschechische Republik. Auskünfte durch: Dr. Tomas Benes, UHUL Forest Management Institute, Tschechische Republik. Tel.: +42-0202800121, Fax: +42-0202803371, e-mail: benes@uhul.cz, Web: www.uhul.cz
- 11.–13. Juni: 3rd International Symposium **Remote Sensing of Urban Areas in Istanbul**, Türkei. Auskünfte durch: Prof. Dr. Derya Maktav (Chair), Istanbul Technical University, e-mail: dmaktav@ins.itu.edu.tr, www.ins.itu.edu.tr/deryamaktav oder PD. Dr. Carsten Jürgens (Co-Chair), Universität Regensburg, e-mail: carsten.juergens@geographie.uni-regensburg.de, oder Prof. Filiz Sunar Erbek (Sekretariat), Istanbul Technical University, Tel.: 0090-0212-2853801, Fax: 0090-0212-5737027, e-mail: fsunar@ins.itu.edu.tr, www.ins.itu.edu.tr/rsurban3
- 24.–28. Juni: **IEEE/IGARSS 2002 in Toronto**, Kanada. Auskünfte durch: Tammy Stein, IEEE Geoscience and Remote Sensing Society. Tel.: +1-281-251 60 67, Fax: +1-281-251 60 68, e-mail: tstein@phoenix.net. Web: www.igrss.org
- 9.–12. Juli: **ISPRS Symposium Com. IV**, 95th Annual Geomatics Conference of CIG and the Spatial Data Handling 2002 Symposium in **Ottawa**. Auskünfte durch: Pres. Dr. Costas Armenakis, Tel.: +1-613-992 44 87, Fax: +1-613-995 41 27, e-mail: armenaki@nrcan.gc.ca, oder: Tom Herbert, Executive Dir. Canadian Institute of Geomatics, 1390 Prince of Wales, Suite 400, Ottawa, Ontario, Canada K2C 3N6, Tel.: 1-613-224-9851, Fax: 1-613-224-9577, e-mail: exdircg@netover.com, www.geomatics2002.org und http://www.commission4.isprs.org/wg3
- 20.–23. August: **ISPRS Symposium Com. II in Xian**, China. Auskünfte durch: Pres. Prof. Chen Jun, Tel.: +86-10-6842 40 72, Fax: +86-10-6842 41 01, e-mail: chenjun@nsdi.gov.cn
- 3.–6. September: **ISPRS Symposium Com. V in Corfu**, Griechenland. Auskünfte durch: Pres. Prof. Petros Patias, Tel.: +30-31-99 61 16, Fax: +30-31-99 61 28, e-mail: patias@topo.auth.gr
- 9.–13. September: **ISPRS Symposium Com. III in Graz**, Österreich. Auskünfte durch: Pres. Prof. Franz Leberl, Tel.: +43-316-873 50 11, Fax: +43-316-873 50 50, e-mail: leberl@icg.tu-graz.ac.at
- 10.–12. September: **ISPRS Symposium Com. VI in Rio de Janeiro**. Auskünfte durch: Pres. Dr. Tania Maria Sausen, Tel.: +55-12-345 68 62, Fax: +55-12-345 68 70, e-mail: tania@ltid.inpe.br
- 18.–20. September: 2nd **EARSeL Workshop on Remote Sensing for Developing Countries in Bonn**. Auskünfte durch: Prof. Dr. G. Menz, University of Bonn, Deptm. of Geography, RSRG, Meckenheimer Allee 166, 53115 Bonn, Tel.: 49-228-739 701, Fax: 49-228-739 702, e-mail: menz@rsrg.uni-bonn.de
- 24.–26. September: **22. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF in Neubrandenburg**. Auskünfte durch: Dr. Klaus-Ulrich Komp, Präsident DGPF, e-mail: Praesident@dgpf.de, Dr.-Ing. Manfred Wiggenhagen, Sekretär DGPF, e-mail: sekretae@dgpf.de, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kresse, FH Neubrandenburg, e-mail: kresse@fh-nb.de, http://www.gdpf.de
- 16.–18. Oktober: **INTERGEO 2002 in Frankfurt a.M.** Auskünfte durch: DVW-Geschäftsstelle, Leiterin Frau Christiane Salbach, e-mail: christiane.salbach@dvw.de oder DVW-Office@t-online.de, http://www.Intergeo.de
- 11.–15. November: **ISPRS Symposium Com. I**, joint meeting with **Pecora XV in Denver**, Colorado, USA. Auskünfte durch: Amy Budge, Tel.: +1-505-277-36 22 ext. 231, Fax: +1-505-277-36 14, e-mail: abudge@spock.unm.edu

4.–6. Dezember: **ISPRS Symposium Com. VII in Hyderabad**, Indien. Auskünfte durch: Pres. Dr. Rangnath Navalgund, Tel.: +91-79-676 88 62, Fax: +91-79-676 27 27 35, e-mail: rangnath@ad1.vsnl.net.in

2004

12.–23. Juli: **XXth ISPRS Congress – Geo Imagery Bridging Continents in Istanbul**, Türkei. Auskünfte durch: Kongressdirektor Prof. Dr. Orhan Altan, Tel.: +90-212-285-38 10, Fax: +90-212-285-65 87, e-mail: oaltan@srv.ins.itu.edu.tr, www.isprs2004-istanbul.com

Neuerscheinungen

MARTIN SCHEU, 2000: Geo-Informationssysteme mit großmaßstäbigem Anwendungsbezug. Deutsche Geodätische Kommission, München, Reihe C, Heft 522, 79 S., ISBN 3-7696-9561-5.

BABAK AMERI SHAHRABI, 2000: Automatic Recognition and 3D Reconstruction of Buildings from Digital Imagery. Deutsche Geodätische Kommission, München, Reihe C, Heft 526, 110 S., ISBN 3-7696-9565-8.

JOCHEN MEIDOW, 2000: Gemeinsame Segmentierung und Interpretation digitaler Luftbilder mit Hilfe der Bayes-Statistik. Dissertation Universität Bonn 2000, 92 S., Shaker Verlag Aachen, ISBN 3-8265-8193-8.

OEEPE Official Publication N° 38, 2000: ROB GOWER, Report: Workshop on National Mapping Agencies and the Internet „Developing Strategies for Geospatial Data in the – New E-Age“, held at Ordnance Survey GB, Southamton, 8–10 March 2000 (26 S.)

A. FLOTRON & OTTO KÖLBL: Precision Terrain Models for Civil Engineering (98 S.) ISSN 0257-0505 und ISBN 3-88648-104-2. Bestellung bei: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Abt. Geoinformationswesen. Richard-Strauss-Allee 11, D-60598 Frankfurt am Main oder unter: www.oeepe.org

CLAUS BRENNER, 2000: Dreidimensionale Gebäuderekonstruktion aus digitalen Ober-

flächenmodellen und Grundrissen. Dissertation Universität Stuttgart. Deutsche Geodätische Kommission, München, Reihe C, Heft 530, 122 S. ISSN 0065-5325 und ISBN 3 7696 9569 0.

GABRIELE BRAUN, REINER BUZIN & THEODOR WINTGES (Hrsg.), 2001: GIS und Kartografie im Umweltbereich. XIV, 209 S. mit CD-ROM. Kartoniert DM 78, Herbert Wichmann, Hüthig Fachverlage, Heidelberg (www.huethig.de oder www.geopoint.de), ISBN 3-87907-356-2

EDWARD M. MIKHAIL, JAMES S. BETHEL & J. CHRIS MCGLONE, 2001: Introduction to Modern Photogrammetry. John Wiley & Sons. Inc., 605 Third Avenue, New York. NY 10158-0012, USA. ISBN 0-471-30924-9

OEEPE Official Publication N° 39, 2001: ANNE RUAS, Chairwoman of the OEEPE working group on generalisation, Report: „Automatic Generalisation Project: Learning Process from Interactive Generalisation“. 102 S., 43 Abb., 46 Tab., 1 Anlage. ISSN 0257-0505 und ISBN 3-88648-307-X. Bestellung bei: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Abt. Geoinformationswesen. Richard-Strauss-Allee 11, D-60598 Frankfurt am Main oder unter: www.oeepe.org

MICHAEL KIEFNER, 2001: Einfluss von Bildkompressionsverfahren auf die Qualität der digitalen Punktübertragung. Dissertation

Universität Stuttgart. Deutsche Geodätische Kommission, München, Reihe C, Heft 531, 115 S. ISSN 0065-5325 und ISBN 3 7696 9570 4.

NATURSCHUTZ UND FERNERKUNDUNG, Referate der gleichnamigen Tagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung und des Bundesamtes für Naturschutz am 11./12.5. 2000, INA, Insel Vilm. BfN-Skripten 42, 2001.

Bearbeitung: Prof. Dr. CORNELIA GLÄßER, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, FB Geowissenschaften, Institut für Geographie, AG Geofernerkundung, Domstraße 5, 06108 Halle (Saale), e-mail: glaesser@geographie.uni-halle.de

Herausgeber: Bundesamt für Naturschutz (BfN), Konstantinstraße 110, 53179 Bonn, e-mail: schumannb@bfn.de

Die BfN-Skripten sind nicht im Buchhandel erhältlich.

Suche alte u. neue Literatur/Prospekte zur **Nahbereichsphotogrammetrie**, insbesondere »Lacmann, O. (1950): *Die Photogrammetrie in ihrer Anwendung auf nichttopographischen Gebieten.*« S. Hirzel Verlag, Leipzig.

Prof. Dr. Thomas Luhmann, Inst. f. Angewandte Photogrammetrie u. Geoinform. Ofener Str. 16, D-26121 Oldenburg, luhmann@fh-oldenburg.de

Kaufgesuch

Suchen 1 Satz

8-fach Okulare für Wild ST4 Spiegelstereoskop.

Ing.-Büro LUBAG GmbH, Im Gewerbepark D 60, D-93059 Regensburg
Tel. 0941/463060, Fax 0941/48741
e-mail: Lubag@t-online.de

Zum Titelbild

Quartärgeologische Übersichtskarte Usedom (modifiziert nach LUNG 1996).

Siehe Beitrag: PRINZ, T. & KRÜGER, K.-P.: Evaluation multitemporaler, hochauflösender Fernerkundungsdaten für den Küstenschutz am Beispiel der Insel Usedom. PFG Heft 5/2001, Seite 317–330 (dieses Heft).