

# PRG

# Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation

Organ der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie,  
Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V.

Jahrgang 2004, Heft 4

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

Schriftleiter:  
Dr. rer.nat. Carsten Jürgens und Dr.-Ing. Eckhardt Seyfert

**Redaktionsbeirat** (Editorial Board): Clement Atzberger, Ralf Bill, Eberhard Gülch,  
Christian Heipke, Barbara Koch, Hans-Gerd Maas, Jochen Schiewe, Matthäus Schilcher  
und Monika Sester



E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung  
(Nägele u. Obermiller) Stuttgart 2004



Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung  
und Geoinformation (DGPF) e.V.  
Gegründet 1909

---

Die *Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation* (DGPF) 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:

© 2004 Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) 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 11/35 14 56-0, Fax: 07 11/35 14 56-99, e-mail: [mail@schweizerbart.de](mailto:mail@schweizerbart.de)  
Internet: <http://www.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](mailto:Klaus.Szangolies@t-online.de)

Schriftleiter: Dr. rer.nat. Carsten Jürgens, Universität Regensburg, Institut für Geographie D-93040 Regensburg, e-mail: [carsten.juergens@geographie.uni-regensburg.de](mailto:carsten.juergens@geographie.uni-regensburg.de) und Dr.-Ing. Eckhardt Seyfert, Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg, Heinrich-Mann-Allee 103, D-14473 Potsdam, e-mail: [eckhardt.seyfert@lvermap.brandenburg.de](mailto:eckhardt.seyfert@lvermap.brandenburg.de)

Erscheinungsweise: 7 Hefte pro Jahrgang.

Bezugspreis im Abonnement: € 108,- pro Jahrgang. Mitglieder der DGPF erhalten die Zeitschrift kostenlos.

Anzeigenverwaltung: Dr. E. Nägele, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Johannesstraße 3A, D-70176 Stuttgart, Tel.: 0711/35 14 56-0; Fax: 0711/35 14 56-99.  
e-mail: [mail@schweizerbart.de](mailto:mail@schweizerbart.de), Internet: <http://www.schweizerbart.de>

Bernhard Harzer Verlag GmbH, Westmarkstraße 59/59a, D-76227 Karlsruhe, Tel.: 0721/9440 20, Fax: 0721/9440 230, e-mail: [Info@harzer.de](mailto:Info@harzer.de), Internet: [www.harzer.de](http://www.harzer.de)

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

## PFG – Jahrgang 2004, Heft 4

### Inhaltsverzeichnis

---

#### Originalbeiträge zum Thema Flugzeug-Laserscanning

MAAS, H.-G. & VOSSELMAN, G.: Flugzeug-Laserscanning, Editorial .....	257
MORSDDORF, F., MEIER, E., ALLGÖWER, B. & NÜESCH, D.: Cluster-Analyse von LIDAR-Vektordaten zur Erfassung geometrischer Eigenschaften von einzelnen Bäumen .....	259
ROTTENSTEINER, F. & BRIESE, CHR.: Automatische Erfassung von Gebäudemodellen aus Laserscannerdaten und die Integration von Luftbildern .....	269
LOHMANN, P. & JACOBSEN, K.: Filterung segmentierter Oberflächenmodelle aus Laserscannerdaten .....	279
BRÜGELMANN, R., BRAND, G. & OUDE-ELBERINK, S.: Qualitätsverbesserung von Laseraltimetrie Höhenmodellen .....	289
HATGER, C. & BRENNER, C.: Extraktion von Eigenschaften der Straßengeometrie aus Laserscannerdaten und vorhandener Geoinformation .....	297
SCHWALBE, E., HOFMANN, A.D. & MAAS, H.-G.: Gebäudemodellierung in reduzierten Parameterräumen von Flugzeug-Laserscannerdaten .....	307
VÖGTLE, T. & STEINLE, E.: Detektion und Modellierung von 3D-Objekten aus flugzeuggetragenen Laserscannerdaten .....	315

#### Originalbeiträge

YASHKIN, S. N.: Transformation of Dynamic Systems Describing Dynamic Objects .....	323
--	-----

#### Aus Wissenschaft und Technik

KÖHLER, P. & LECHTENBÖRGER, C.: GIS und Informations-Management im „Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology“ .....	331
---	-----

---

#### Berichte und Mitteilungen

##### Berichte:

GOFC-GOLD Land Cover, ESA-Workshop, 2.–4. März 2004 in Jena ..	337
ISPRS Kongress Istanbul 2004: – Otto von Gruber Preis .....	338
– Schwidefsky-Medaille .....	339

##### Hochschulnachrichten

– Universität Hannover .....	340
– Technische Universität Berlin .....	341
– Technische Universität München .....	342
– Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg .....	342
– Universität Zürich .....	343
– ETH Zürich .....	344

Vorankündigungen .....	345
------------------------	-----

Buchbesprechung – Linder .....	349
--------------------------------	-----

Zum Titelbild .....	351
---------------------	-----

Neuerscheinungen .....	352
------------------------	-----

# INTERGEO®

Kongress und Fachmesse für Geodäsie,  
Geoinformation und Landmanagement



13. - 15. Oktober 2004

Messe Stuttgart

Experten aus aller Welt ...

...treffen sich auf der weltweit größten  
Kongressmesse für Geodäsie, Geo-  
information und Landmanagement

- Netzplanung mit  
Geoinformationssystemen
- Mobile GIS/ Internet
- Location Based Services

Informationen unter:

[www.intergeo.de](http://www.intergeo.de)

## FACHMESSE

HINTE GmbH  
Griesbachstr. 10  
D-76185 Karlsruhe  
Tel. +49 (0)721 / 9 31 33-0  
[info@hinte-messe.de](mailto:info@hinte-messe.de)  
[www.intergeo.de](http://www.intergeo.de)

## KONGRESS

Örtlicher Vorbereitungsausschuss  
Kongress-Sekretariat  
Postfach 10 29 62  
D-70025 Stuttgart  
Tel. +49 (0)711 / 123-2903  
[hanfried.kohlscheen@vermbw.bwl.de](mailto:hanfried.kohlscheen@vermbw.bwl.de)



## Flugzeug-Laserscanning

HANS-GERD MAAS, Dresden & GEORGE VOSSelman, Delft

**Keywords:** photogrammetry, airborne laser scanning, Lidar processing, multisensor processing, laser altimetry, DEM, DTM

Flugzeug-Laserscanning hat sich in ziemlich kurzer Zeit als ein neues Verfahren mit einem breiten Anwendungspotential in der Photogrammetrie etabliert. Nach ersten kommerziellen Anwendungen in den 90er Jahren kann Flugzeug-Laserscanning heute bereits als ein Standardverfahren der Photogrammetrie angesehen werden. Insbesondere für die Generierung von hochwertigen digitalen Gelände- oder Oberflächenmodellen hat es andere Verfahren weitgehend verdrängt. Als aktives Messverfahren bietet Flugzeug-Laserscanning hier die Vorteile großer Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Schnelligkeit. Über diese ‚Standardanwendung‘ in der Generierung digitaler Geländemodelle hinaus hat die Technik im Laufe der letzten Jahre aber auch ihre gute Eignung für eine Reihe weiterer Teilaufgaben im Bereich der Akquisition dreidimensionaler Geodaten bewiesen. Beispiele hierfür sind die (halb-)automatische Generierung dreidimensionaler Gebäudemodelle als Bestandteil dreidimensionaler Stadtmodelle, die Bestimmung charakteristischer Parameter wie Baumhöhe, Holzvolumen, Biomasse und Wachstum in Waldbeständen oder auch die Überwachung von Hochspannungsleitungen mit dem Ziel der Waldbrandprävention.

Sowohl die Sensorik wie auch die Datenverarbeitungskette im Bereich Flugzeug-Laserscanning haben sich im vergangenen Jahrzehnt rapide entwickelt, und beide erscheinen noch lange nicht ausgereizt. Während frühe Systeme mit Datenraten von 2–5 kHz arbeiteten, bieten aktuelle Systeme Datenraten in der Größenordnung von 80–100 kHz. Dies ermöglicht die Generierung von hoch auflösenden Oberflächenmodellen

mit Punktabständen von deutlich unter einem Meter bei einer Höhengenaugigkeit von etwa einem Dezimeter. Zusätzliche Eigenschaften wie die Messung mehrerer Echos je ausgesandtem Puls und die Speicherung der Pulsintensität oder die Digitalisierung des kompletten Pulsechos (‚Waveform‘) erlauben weitergehende Analysemöglichkeiten.

Die Entwicklung von Algorithmen zur Verarbeitung von Flugzeug-Laserscannerdaten konzentrierte sich anfangs auf Filterwerkzeuge zur Ableitung des digitalen Geländemodells aus digitalen Oberflächenmodellen. Mittlerweile findet sich in der Literatur eine breite Palette von Publikationen zur automatischen Extraktion dreidimensionaler Geoinformation aus Flugzeuglaser-scannerdaten. Das Verfahren erweist sich dabei aufgrund der Charakteristik der 2<sup>1/2</sup>-dimensionalen Punktwolken in vielen Anwendungen als ausgesprochen automatisierungsfreundlich.

Damit hat das Verfahren der Photogrammetrie auch eine Reihe gänzlich neuer Anwendungsgebiete eröffnet. So wurden insbesondere in Anwendungen in der Forstwissenschaft die Erfassung von Geländemodellen des Waldbodens oder die flächenhafte Bestimmung von Vegetationshöhen ermöglicht – Aufgabenstellungen, welche bislang photogrammetrisch allenfalls partiell gelöst werden konnten. Auch die regelmäßige Überwachung von Hochspannungsleitungen kann als neues Marktsegment angesehen werden, für welches erst mit Flugzeug-Laserscanning ein effizientes Messwerkzeug zur Verfügung steht.

Die Frage, inwieweit sich Flugzeug-Laserscanning und digitale Luftbildkameras

konkurrenzieren, kann leicht beantwortet werden: Sie ergänzen sich. Flugzeug-Laserscannerdaten und digitale Bilddaten weisen weitgehend komplementäre Eigenschaften auf. Digitale Kameras erzeugen als passive Messsysteme Bilder mit hoher geometrischer Auflösung und hohem Interpretationsgehalt. Laserscannerdaten weisen in der Regel eine deutlich geringere räumliche Auflösung auf, sind aber aufgrund des Charakters als aktives Messverfahren und der guten Strukturiertheit der erzeugten  $2\frac{1}{2}$ -D Punktwolken sehr automatisierungsfreundlich. Auch hinsichtlich der Genauigkeit können die beiden Verfahren als komplementär angesehen werden: Während bei der stereophotogrammetrischen Auswertung – abhängig vom Basis-Höhenverhältnis – die Lagegenauigkeit meist besser ist als die Höhengengenauigkeit, ist dies beim Flugzeuglaserscanning in der Regel umgekehrt. Damit liegt es nahe, beide Datenquellen gemeinsam auszuwerten. Um diese Datenfusion sensorseitig zu unterstützen, weisen immer mehr Laserscannersysteme eine auf der Meßplattform integrierte digitale Kamera auf. Hinsichtlich der konsequenten Datenfusion bei der automatischen Verarbeitung

der komplementären Daten besteht dagegen derzeit noch erheblicher Forschungsbedarf.

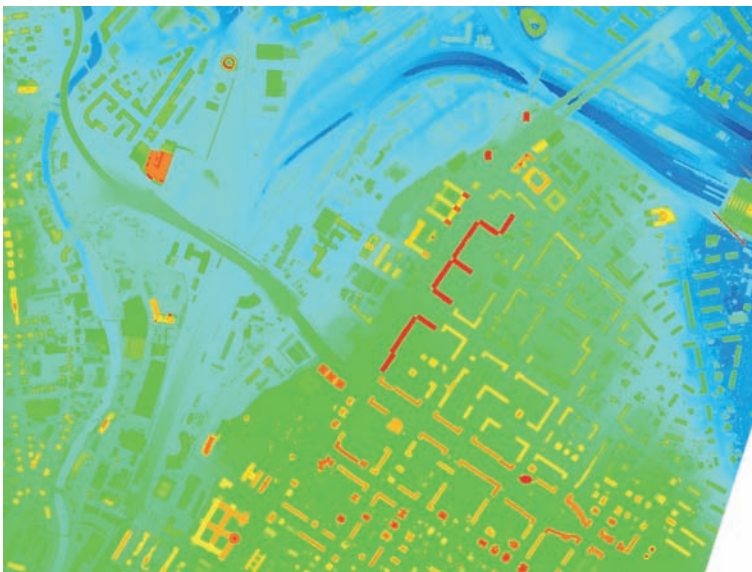
Die Publikationen dieses Schwerpunkt-heftes wurden größtenteils aus den Beiträgen zum ISPRS WG III/3 Workshop ‚3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data‘ ausgewählt, welcher im Oktober 2003 in Dresden stattfand. Mit 42 eingereichten Beiträgen, 110 Teilnehmern und einer Ausstellung mit 10 Firmen stellte dieser Workshop einen Beweis für die Aktualität des Themas dar.

#### Anschriften der Autoren:

Prof. Dr.-Ing. HANS-GERD MAAS  
Technische Universität Dresden  
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung,  
Helmholtzstraße 10, D-01062 Dresden  
e-mail: hmaas@rcs.urz.tu-dresden.de

Prof. Dr. GEORGE VOSSELMAN  
Photogrammetry and Remote Sensing  
Delft University of Technology  
Faculty of Aerospace Engineering  
P.O. Box 5058, NL-2600 GB Delft  
e-mail: M.G.Vosselman@lr.tudelft.nl

Manuskript eingereicht: April 2004  
Angenommen: Mai 2004



Farbcodierte Höhen Darstellung eines Teils des Dresdner Stadtgebiets aus Flugzeug-Laserscannerdaten: Links der Flusslauf der Weißeritz, rechts die Einfahrt zum im August 2002 überfluteten Dresdner Hauptbahnhof (MilanFlug 11/2002, © Landes-Talsperrenverwaltung, Freistaat Sachsen)

## Cluster-Analyse von LIDAR-Vektordaten zur Erfassung geometrischer Eigenschaften von einzelnen Bäumen

FELIX MORSDORF, ERICH MEIER, BRITTA ALLGÖWER & DANIEL NÜESCH, Zürich

**Keywords:** laser scanning, LIDAR, segmentation, cluster analysis, tree height, reconstruction

**Zusammenfassung:** Basierend auf einem LIDAR Datensatz mit einer Punktdichte von mehr als 20 Punkten pro m<sup>2</sup> versuchen wir die geometrischen Eigenschaften von Einzelbäumen abzuleiten. Die Genauigkeit der LIDAR Messungen wurde durch 6 geometrische Ziele bestimmt, welche 3 m mal 3 m groß und im Mittel ca. 1 m über dem Boden angebracht waren. Die internen Lageoffsets der Laserdaten war kleiner als 0.25 m, die Standardabweichung der Höhe der Punkte auf den Flächen betrug 0.06 m. Wir führen eine Unterteilung der LIDAR Rohdaten mit Hilfe einer überwachten Klassifikation durch und validieren diesen Ansatz mit Feldmessungen von etwa 1200 Bäumen. Dieser Datensatz beinhaltet Baumposition, -höhe sowie den Kronendurchmesser und wurde auf einer Langzeitmessfläche der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) erhoben. Eine robuste lineare Regression der aus den LIDAR Daten ermittelten Baumhöhen mit den Feldmessungen ergibt annähernd ein 1:1 Verhältnis mit einer Steigung von 0.92 und einem Achsenabschnitt von 0.47 m, bei einem RMS von 0.6 m. Dieses ergibt eine geringe Unterschätzung der Baumhöhen durch die LIDAR Messungen.

**Summary:** *Cluster Analysis of LIDAR Raw Data for Geometric Property Derivation of Single Trees.* Using a LIDAR dataset having a high point density of more than 20 points per square meter, we test the potential of deriving geometric properties of single trees. The accuracy of the LIDAR data is evaluated using 6 geometric reference targets, being 3 m by 3 m in size and a height of about 1 m above ground. The internal translational offsets of the LIDAR data were found to be less than 0.25 m, and the standard deviation of the height values on the targets were 0.06 m. We carried out a segmentation of the LIDAR raw data using cluster analysis and validated this approach using field measurements for about 1200 trees. The measurements were taken by the Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research and contained properties as tree-position, -height and crown diameter. A linear robust regression of field measured tree heights and LIDAR derived ones resulted in a relationship close to 1:1, with a slope of 0.92 and an offset of 0.47 m, with the RMS being at 0.6 m. This manifests a slight underestimation of tree height by the LIDAR measurements.

### 1 Einleitung

Das Potenzial des flugzeuggetragenen ‚Laserscannings‘ zur Erfassung von Forstparametern ist in den letzten Jahren intensiv evaluiert worden. Algorithmen zur Bestimmung von strukturellen Forstparametern auf Bestandes- oder Plotebene wurden bereits von einigen Wissenschaftlern erfolgreich implementiert (MEANS et al. 2000,

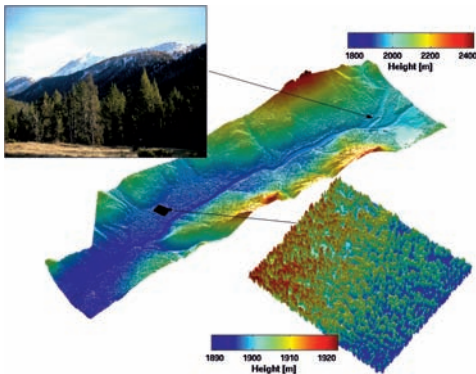
DRAKE et al. 2002, NAESSET & OEKLAND 2002). Da mittlerweile LIDAR Systeme mit sehr hoher Punktdichte (> 10 Punkte/m<sup>2</sup>) verfügbar sind (BALTSAVIAS 1999), wurde die Ableitung von diesen geometrischen Parametern auf Basis von einzelnen Bäumen vermehrt Ziel wissenschaftlicher Arbeiten. Die bisherigen Ansätze zur Detektion von Einzelbäumen basierten zumeist auf einer Unterteilung des Oberflächenmodells

(DOM, *Digitales Oberflächen Modell*) oder Vegetationsmodells (Differenz DOM-DGM *Digitales Gelände Modell*) wie zum Beispiel bei HYYPPAE et al. 2001 oder PERSSON et al. 2002. Da bei der Interpolation der Rohdaten in die Rastermodelle Information verloren geht, ist man vermehrt dazu übergegangen direkt mit den Rohdaten zu arbeiten (PYSSALO & HYYPPAE 2002, BRANDENBERG et al. 2003). So haben zum Beispiel ANDERSEN et al. (2002) ellipsoide Kronenmodelle unter Verwendung eines zusätzlichen, stochastischen Terms an die Rohdaten angepasst, und in diesem Prozess die Interaktion zwischen Kronen und Laserpuls statistisch modelliert. Wir werden eine neue Methode vorstellen, um die LIDAR Rohdaten in Echos von einzelnen Bäumen zu unterteilen. Diese ermöglichen dann das direkte Ableiten ihrer geometrischen Eigenschaften aus der dreidimensionalen Punktwolke.

## 2 Testgebiet und Daten

### 2.1 Testgebiet und Feldmessungen

Das Testgebiet befindet sich im Schweizer Nationalpark in Höhen von 1800 bis 2400 m ü. NN. Die Vegetation ist boreal und wird von Beständen aus Bergföhren und Lärchen dominiert, welche von ein paar Alpweiden unterbrochen werden. Auf einer kleinen Teilfläche (ca. 1.5 ha) des Testgebietes unter-



**Abb. 1:** Digitales Oberflächen Modell (DOM) des Ofenpassgebietes im Schweizer National-Park. Die Langzeitmessfläche der WSL ist vergrößert. Das Foto wurde am Tag des LIDAR-Fluges aufgenommen.

hält die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) eine Langzeitmessfläche, die ungefähr 1200 Bäume mit einem Brusthöhendurchmesser (BHD) von größer als 0.15 m enthält. Zu dieser Fläche existiert eine Datenbank mit Position der Bäume, Baumhöhe, Kronendurchmesser sowie BHD, welche mit GPS und Standard-Forstwerkzeugen wie einem Hypsometer ermittelt wurden. In Abb. 1 ist ein Überblick über das Testgebiet gegeben.

### 2.2 Laser Scanning Daten

Im Oktober 2002 fand eine Befliegung des Testgebietes mit einem Helikopter statt, welche ein Gebiet von ungefähr 14 km<sup>2</sup> abdeckte. Das zur Anwendung kommende LIDAR System war der Falcon II Sensor der deutschen Firma TopoSys ([www.toposys.com](http://www.toposys.com)). Es handelt sich dabei um einen *push broom* Laser Altimeter, welcher sowohl das erste als auch das letzte Echo vom Boden aufzeichnen kann (*first/last pulse*). Der Flug wurde mit einer nominalen Flughöhe von ca. 850 m über Grund durchgeführt, was zu einer mittleren Punktdichte am Boden von mehr als 10 Punkten pro Quadratmeter führte. Eine kleinere Fläche (0.6 km<sup>2</sup>) wurde zusätzlich in einer Höhe von 500 m über Grund überflogen, was eine Punktdichte von mehr als 20 Punkten pro Quadratmeter erbrachte. Die Kombination von beiden Datensätzen ergibt eine sehr hohe Punktdichte von mehr als 30 Punkten pro Quadratmeter für diese Teilfläche, in welcher sich auch die Messfläche der WSL befindet. Der Durchmesser des Laserstrahls am Boden (*foot-print*) liegt bei ungefähr 0.6 m beziehungsweise 0.9 m für die jeweiligen Flughöhen von 500 m und 850 m über Grund. Die Rohdaten, die vom Sensor erfasst wurden (x, y, z-Tripel) wurden von TopoSys mit ihrer eigenen Software in Rastermodelle interpoliert. Das digitale Oberflächenmodell (DOM, beinhaltet Vegetation und Gebäude) wurde aus den *first pulse* Daten ermittelt, das digitale Geländemodell (DGM) wurde mit Hilfe der *last pulse* Echos und Filteralgorithmen erstellt. Die entstehenden Lächer wurden von uns durch nachbarschaftstreu



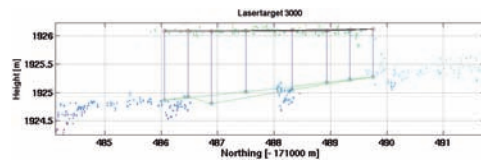
Interpolation geschlossen. Die Gitterweite der Modelle lag bei einem Meter für das Gesamtgebiet und einem halben Meter für das Teilgebiet, wobei die Höhenauflösung in beiden Fällen bei 0.1 m liegt.

### 2.3 Qualitätsanalysen

Eine einfache Qualitätsanalyse der LIDAR Daten wurde mit Hilfe von 6 geometrischen Referenzflächen durchgeführt, welche 3 m × 3 m maßen und ungefähr 1–1.5 m über dem Boden angebracht waren (siehe Abb. 2). Die Flächen wurden mit Hilfe einer digitalen Winkelwaage auf weniger als 0.5 Grad genau horizontal ausgerichtet. Die Positionen der 4 Ecken wurden mit einem Theodoliten bestimmt, der auf GPS Fixpunkte abgestützt wurde, welches die interne Genauigkeit der Vermessung auf ungefähr 2 cm steigen ließ. Mit den Positionen dieser 6 Ziele wurden die fertigen Modelle von TopoSys in Lage und Höhe um einige Meter (1/3.5 m für Hochwert/Rechtswert) rein translatorisch verschoben, so dass die Positionen der Flächen nur noch für Aussagen über die interne Genauigkeit der Laserdaten verwendet werden können. Nach dieser Verschiebung ergab sich für alle Flächen eine Positionsgenauigkeit des Modells von weniger als 0.5 m und eine Höhengenauigkeit von 0.15 m. Mit dieser Methode erfassen wir allerdings nur die Genauigkeit des DOM bzw. des DGM auf freien Flächen, wir können keine Genauigkeit für das DGM an bewaldeten Stellen ableiten, wo die Güte des DGM sehr stark von verwendeten Filteralgorithmen, der Vegetations-



**Abb. 2:** Ansicht des Ofenpassgebietes mit zwei Referenzflächen (die zweite befindet sich links im Hintergrund).



**Abb. 3:** Seitenansicht einer der 6 Referenzflächen, überlagert mit den LIDAR Rohdaten, grün entspricht *first pulse*, rot *last pulse* Daten. Die Punkte, die hier unterhalb der Fläche erscheinen, befinden sich im 3d-Raum vor und hinter der Fläche.

dichte und Beschaffenheit der Topographie abhängt. Andere Studien beschäftigen sich wesentlich eingehender mit diesem Aspekt (KRAUS & PFEIFER 1998).

Weiterhin benutzen wir die Flächen um eine Information über das Rauschen des Sensors auf einer glatten, homogen reflektierenden Fläche zu erhalten. Dieses wird sicherlich nur die untere Schranke für das Sensorrauschen sein, welches auf komplizierteren Oberflächen größer sein wird. Um eine Abschätzung des Rauschens zu bekommen haben wir die Standardabweichung aller Echos, welche von den Flächen reflektiert werden, berechnet (siehe Abb. 3). Die Ungenauigkeit bezüglich der Position der Flächen wurde aus den Schwerpunkten der Flächen und den Schwerpunkten der Punktwolke der Echos von diesen Flächen berechnet. Diese Abweichungen stellen jedoch nur die interne Ungenauigkeit der Laserstreifen dar, da die Modelle (und auch die Rohdaten) schon absolut translatorisch korrigiert

**Tab. 1:** Höhen- und Lageabweichungen der Referenztargets in den LIDAR-Rohdaten.

ID	Anzahl Punkte	$\Delta$ Höhe (cm)	$\sigma$ Höhe (cm)	$\Delta$ x (cm)	$\Delta$ y (cm)
1000	107	3	6.8	9	7
2000	133	-2	5.9	24	-11
3000	75	-2	6.6	6	6
4000	190	1	5.6	15	-3
5000	151	-2	5.8	4	15
6000	138	2	5.2	25	-18

wurden. Die Werte für die Abweichungen und das Rauschen können Tab. 1 entnommen werden. Die geringen mittleren Höhenabweichungen von 1 bis 3 cm und ihre nicht systematische Verteilung über das Testgebiet (die Flächen sind von West nach Ost nummeriert) lassen den Schluss zu, dass es keine Verkippung der Laserstreifen in dieser Richtung gibt. Weiterhin ist die Standardabweichung der Echos auf den Flächen mit ca. 5–6 cm erstaunlich klein, und auch hier lassen sich keine signifikanten Differenzen zwischen den einzelnen Flächen feststellen, so dass der Sensor in dieser Hinsicht als sehr stabil bezeichnet werden kann.

### 3 Klassifikation mit *k-means* Cluster-Analyse

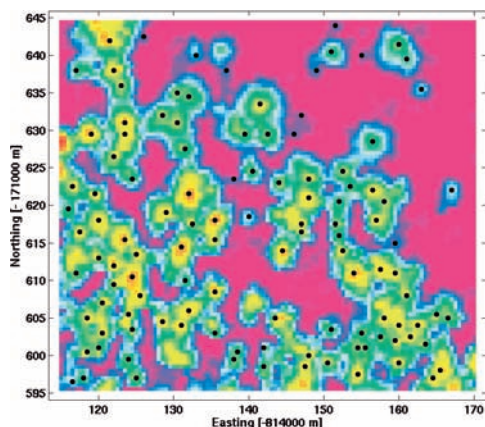
Die *Cluster* Analyse ist ein bekanntes und verbreitetes Werkzeug zur statistischen Analyse von Messdaten. Hierbei wird ein Merkmalsraum in  $k$  Bereiche aufgeteilt, die jeweils ähnliche Werte aufweisen. Die Ähnlichkeit wird meistens über eine spezifische Metrik definiert. In unserem Fall bilden die Koordinaten  $(x, y, z)$  den Merkmalsraum und wir verwenden eine einfache euklidische Distanz als Metrik. Der *k-means* Algorithmus versucht dann iterativ die globale Summe der Distanzen der jeweiligen *Cluster*-Mitglieder zu ihren Mittelpunkten (*centroids* oder *bouys*) zu minimieren. Dieser Prozess ist sehr rechenaufwändig, da bei jeder Iteration alle diese Distanzen neu berechnet werden müssen. Zumeist werden die Mittelpunkte im ersten Schritt der Iteration zufällig verteilt, und das Ergebnis der Analyse hängt dann stark von dieser Verteilung ab, da man das globale Minimum der Distanzen (beste Lösung) dann oft nicht erreicht. Also muss man diese Startpunkte entweder auf eine sinnvolle Art bestimmen oder aufwändig ausprobieren. Da die von uns untersuchten Bergföhren über genau eine definierte Spitze, welche meistens horizontal mittig platziert ist, verfügen, bietet sich die Position der Spitzen zur Verwendung als Startpunkte an. Folglich wird der erste Teil unserer Methode aus der Ermittlung von lokalen Maxima im DOM bestehen, der zweite

umfasst dann die eigentliche *Cluster* Analyse in den Rohdaten, mit den Koordinaten der lokalen Maxima als Startpositionen.

#### 3.1 Finden der lokalen Maxima

Die Extraktion von lokalen Maxima aus einem Tiefenbild ist keine leichte Aufgabe; komplizierte *watershed* Algorithmen, bei denen simulierte Wassertropfen eingesetzt werden, liefern generell die besten Ergebnisse. Ein großes Problem ist die Fehlklassifikation, bei welcher zu viele Maxima oder zu wenige gefunden werden. Wenn jedoch die Maxima in Form und Ausdehnung möglichst homogen sind, so kann man auch mit einfacheren Methoden gute Ergebnisse erzielen.

Unsere Methode basiert auf der Tatsache, dass das Maximum einer Pixelzeile des DOM durch einen Nulldurchgang in der ersten Ableitung (Steigung) und ein Extrem in der zweiten Ableitung (Krümmung) gekennzeichnet ist. Bei einem nicht geglätteten Modell wird man nun zu viele Maxima finden, da Rauigkeit auf den Skalen unterhalb der Kronendurchmesser auch lokale Maxima produziert. Wenn man jedoch diese Rauigkeit aus dem DOM herausfiltert, werden am Ende nur die Maxima der Baumkronen gefunden. Natürlich müssen die Parameter eines solchen Filters an die jeweiligen Kronendurchmesser und Gitterauflösungen angepasst werden. Wir verwenden in unserem Fall, bei einer Auflösung des Modells von 0.5 m und mittleren Kronendurchmessern von 1.5 bis 3 m (aus den Feldmessungen) einen rotationssymmetrischen, Gaußschen Tiefpassfilter mit einem Durchmesser von 12 Gitterpunkten und einer Standardabweichung von 0.5. Die lokalen Maxima werden anschließend über ihre analytischen Kriterien (notwendig und hinreichend) für jede Gitterzeile einzeln gesucht. Dieses geschieht für beide Koordinatenrichtungen, so dass man am Ende zwei Datensätze erhält, einen mit den lokalen Maxima in  $x$ - und einen mit den lokalen Maxima in  $y$ -Richtung. Diese werden dann mit einem logischen UND kombiniert, so dass nur noch die lokalen Maxima aus  $x$  und  $y$  Richtung übrig



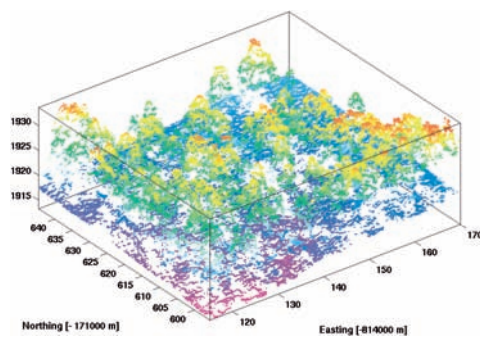
**Abb. 4:** Die Startpunkte der Cluster Analyse, wie von unserem lokalen Maxima Filter im DOM gefunden.

bleiben, die in beiden Bildern an der gleichen Stelle vorhanden sind. Das Ergebnis dieses Filters ist in Abb. 4 dargestellt, wobei die schwarzen Punkte die gefundenen lokalen Maxima repräsentieren. Man kann auch erkennen, dass einige Maxima einen relativ großen Bereich einnehmen, bei dem wahrscheinlich mehrere Bäume zusammen nur ein lokales Maximum bilden. Dieses bringt natürlich Probleme für die Unterteilung mit sich, welche dann in Abschnitt 4.1 genauer besprochen werden.

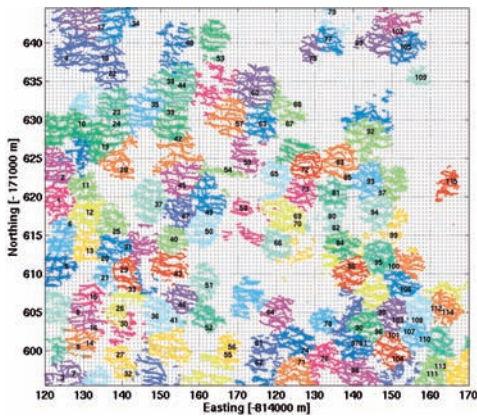
### 3.2 Cluster-Analyse in der dreidimensionalen Punktwolke

Die Verwendung einer euklidischen Metrik favorisiert das Unterteilen des Merkmalsraums in kugelförmigen Objekten, die Kronen der Bergföhren sind aber Ellipsoide mit einem Höhen/Breiten-Verhältnis von 2–3 zu 1. Aus diesem Grund führen wir ausgehend von den Feldmessungen eine Skalierung der Höhe  $z \rightarrow z'$  von  $1/2$  ein. Dieses lässt die Baumkronen im neu geschaffenen Merkmalsraum  $(x, y, z')$  kugelähnlich erscheinen. Es werden sowohl *first-* als auch *last pulse-* Daten für die Klassifikation genutzt, ohne zwischen den beiden Echoarten zu unterscheiden. Wir benutzen für die Analyse den *k-means* Algorithmus, implementiert nach SPATH (1985). Der Algorithmus klassifiziert

die Rohdaten in einem iterativen Prozess, welcher in zwei Teile geteilt ist. Im ersten Teil werden so genannte *batch updates* durchgeführt, bei denen jeder Schritt daraus besteht, alle Echos ihrem nächsten *Cluster-Mittelpunkt* zuzuweisen, gefolgt von einer Neubestimmung der Mittelpunkte. Der zweite Teil besteht aus *online updates*, wo Echos individuell neuen Gruppen zugeordnet werden, wenn das die Summe der Distanzen reduziert, wiederum gefolgt von einer Neuberechnung der *Cluster-Mittelpunkte*. Um nicht auch Bodenechos zu klassifizieren, wurde ein Schwellwert von 1 m über der Höhe des DGM angewandt. Abb. 5 zeigt denselben Ausschnitt Abb. 4. Wir benutzen in diesem Beispiel nur die Daten des tiefen Überfluges mit mehr als 20 Echos pro Quadratmeter. Dieses ist im Vergleich zu normalen kommerziellen Datensätzen eine hohe Punktdichte, allerdings sollte erwähnt werden, dass die Baumkronen in der Messfläche sehr kleine Durchmesser von 1.5 bis 3 m aufweisen, so dass die Methode bei größeren Kronendurchmessern auch mit der normalen Punktdichte von ca. 10 Echos pro Quadratmeter gute Resultate liefern sollte. Da *small footprint* LIDAR-Rohdaten schnell bis zu 400 MB pro  $\text{km}^2$  umfassen können, ist die Prozessierung dementsprechend rechenaufwändig. Allerdings benötigt keiner der oben aufgeführten Schritte eine spezielle Interaktion des Benutzers. Da



**Abb. 5:** Die LIDAR Rohdaten in einer perspektivischen Ansicht; nur Daten des tiefen Überfluges wurden hier verwendet. Gelbe und rote Werte markieren hohe Elevationen, wohingegen blaue und violette für tiefere z-Werte stehen.



**Abb. 6:** Die klassifizierten Rohdaten in der  $x, y$  Ebene, verschiedene Farben und Nummern zeigen die Cluster Zugehörigkeit an. Gleicher Ausschnitt wie Abb. 4 und 5

eine Klassifikation eines größeren Gebietes sehr lange dauert und auch nicht notwendig ist (man berechnet Abstände von Punkten, von denen man weiß, dass sie nicht im gleichen Cluster liegen können), haben wir den Algorithmus in überlappenden Fenstern von  $50\text{ m} \times 50\text{ m}$  Größe laufen lassen. In einem ebenfalls automatisierten Schritt werden dann doppelte (im Überlappungsbereich von 50%) oder nur partiell vorhandene Cluster (an den Kanten) aussortiert. Für den kleineren Teil des Datensatzes von  $0.6\text{ km}^2$  dauerte die Prozessierung ungefähr einen Tag auf einem state-of-the-art PC. Da die Geometrie des Waldbestandes aber kein sehr schnell ändernder Parameter ist, sollte dieses für die Anwendbarkeit der Methode nicht hinderlich sein.

Das Ergebnis der Klassifikation ist Abb. 6 zu entnehmen. Die Rohdaten sind in die  $x, y$ -Ebene projiziert, um die horizontalen Grenzen besser erkennen zu können. Die Zahlen geben den Cluster Index und die Farben die Cluster Zugehörigkeit an.

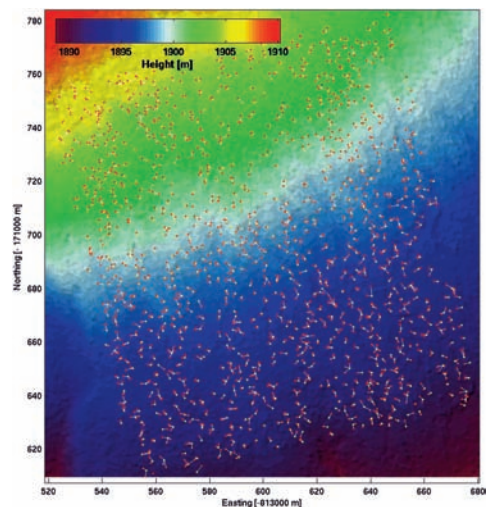
## 4 Ergebnisse

### 4.1 Validierung mit Feldmessungen

Da wir mehr als 1200 Feldmessungen den aus den LIDAR Daten ermittelten Größen

zuordnen mussten, haben wir dafür ebenfalls einen automatischen Prozess implementiert. Wir haben nur ca.  $3/4$  aller Bäume mit  $\text{BHD} > 0.15\text{ m}$  in der Testfläche korrekt detektiert, da es dort häufig zu einem so genannten *clumping* der Bäume kommt, d. h. es stehen mehrere Bäume in einem sehr engen Radius (typischerweise  $< 1.5\text{ m}$ ) zusammen, die im Feldinventar alle einzeln aufgeführt werden, im DOM aber nur ein lokales Maximum ergeben.

Mehrere Bäume in einem sehr kleinen Radius vorzufinden, ist ein typisches Merkmal der Vegetation auf unserer Testfläche im Schweizer Nationalparks (DOBBERTIN et al. 2001). Um dieses Problem in die Zuordnung eingehen zu lassen, gehen wir von den Feldmessungen aus und suchen den von der Position her nächsten Baum in den LIDAR-Daten. Auf diese Weise können mehrere Feldmessungen einem LIDAR-Cluster zugeordnet werden, was genau den Effekt des *clumping* berücksichtigt. Da die gezeigte Messfläche vollständig, d. h. jeder Baum mit



**Abb. 7:** Das Zuordnen der Feldmessungen (rote Punkte) zu denen aus den LIDAR Daten ermittelten (gelbe Punkte) geschieht automatisch über die Distanz. Die kurzen, weißen Linien verbinden zugeordnete Werte; dabei kann eine LIDAR Messung mehreren Feldmessungen zugeordnet werden, um den Effekt des *clumping* um dominante Bäume herum zu berücksichtigen. Im Hintergrund ist eine schattierte Darstellung des DGM zu erkennen.

BHD > 0.12 m, erfasst wurde, ist ein solches Vorgehen möglich. Das Resultat dieser Zuordnung ist Abb. 7 zu entnehmen.

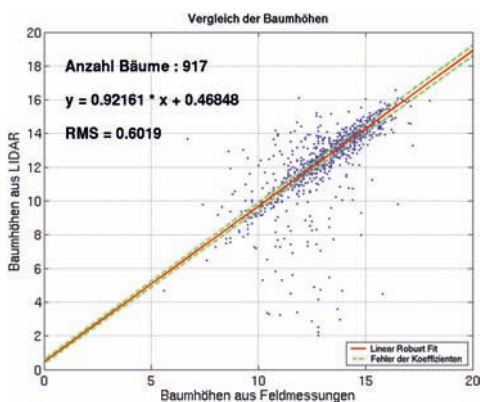
Wir gehen davon aus, dass es für jeden LIDAR-Cluster eine Feldmessung geben muss. Für den Fall, dass mehrere Feldmessungen einem Cluster zugeordnet wurden, ist lediglich der höchste (dominante) Baum der Feldmessungen in die Regression übernommen worden, da der höchste Wert des LIDAR-Clusters diesem Baum entsprechen sollte.

#### 4.2 Regression von Baumhöhen und Kronendurchmessern

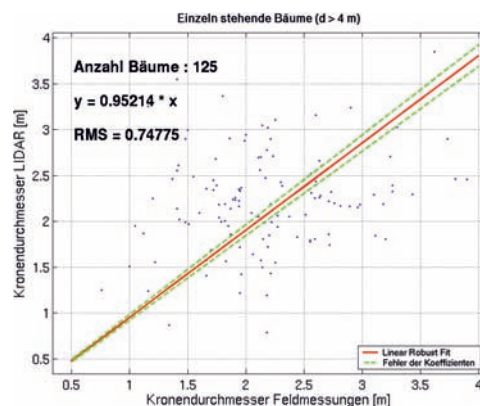
Nach erfolgreicher Zuordnung der Feldmessungen zu unseren LIDAR-Messungen können wir nun eine Regression der Baumhöhen durchführen. Durch den automatischen Zuordnungsprozess sind einige Ausreißer entstanden (Abb. 8), welche wir nicht in die Regression einfließen lassen möchten. Deshalb wählen wir eine robuste lineare Regression (HUBER 1981), welche Ausreißer weniger stark gewichtet. Wir können dieses aus zwei Gründen tun: zum Einen wissen wir um die Ursache der Ausreißer (fehlerhafte Zuordnung) und zum Anderen wird nur ein kleiner Teil der Daten als kompletter Ausreißer klassifiziert (ca. 9%, entnommen

aus dem Histogramm der Gewichte). Die berechneten Fehlergrenzen für die Koeffizienten des linearen Modells ( $y = m * x + b$ ) sind ebenfalls in Abb. 8 zu finden. Die so ermittelte Steigung liegt fast bei 1 (0.92) und besitzt einen Achsenabschnitt von ungefähr einem halben Meter (0.47 m). Dieses manifestiert eine Unterschätzung der Baumhöhen mit dem LIDAR, welche auch von anderen Autoren gefunden wurde (GAVEAU & HILL 2003, PERSSON et al. 2002). Da man nicht alle Baumspitzen notwendigerweise direkt mit dem Laserstrahl trifft (beprob), ist diese systematische Unterschätzung systembedingt. Bei höherer Punktdichte sollte dieser Effekt kleiner werden. Eine zusätzliche Ursache für die Unterschätzung ist die Tatsache, dass der *first pulse* nicht notwendigerweise, selbst wenn er die Spitze trifft, dort detektiert wird, denn es ist eine gewisse Dichte der Vegetation vonnöten, um wirklich ein Echo zu generieren. Dieses wird unter Umständen etwas tiefer als die tatsächliche Baumspitze liegen, abhängig vom Vegetationstyp und Durchmesser des Laserstrahls.

Für eine Regression der Kronendurchmesser ergibt sich ein größeres Problem durch das *clumping* der Bäume als für die Baumhöhen, da ein dominanter Durchmesser für eine Gruppe von Bäumen nicht de-



**Abb. 8:** Robuste Regression der Feldmessungen der Baumhöhen gegen unsere LIDAR Messungen, bei der Ausreißer weniger stark gewichtet werden. Fehlergrenzen für die Koeffizienten des linearen Modells wurden bestimmt und als grüne, gestrichelte Linie eingezeichnet.



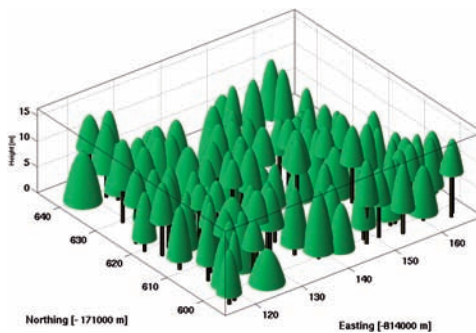
**Abb. 9:** Regression der Kronendurchmesser der Bäume, die mindestens 4 Meter vom nächsten entfernt sind. Es wurde ebenfalls eine robuste Regression durchgeführt, allerdings ohne einen Achsenabschnitt im linearen Modell zuzulassen.

finiert ist und man den Durchmesser der Baumgruppe nur unter Verwendung von allen einzelnen Positionen und Durchmessern berechnen könnte. Um dieses Problem zumindest teilweise zu umgehen, benutzen wir als ersten Schritt nur Bäume für die Regression, die mindestens 4 Meter vom ihrem nächsten Nachbarn entfernt sind (Abb. 9). Dieses reduziert die Zahl der Werte für die Regression auf 125. Wir verwenden ein lineares Modell ohne Achsenabschnitt ( $y = m * x$ ), und nehmen die Regressionsgerade nur als Anhaltspunkt für den Zusammenhang  $y = x$ , um die Messwerte besser einordnen zu können. Die große Streuung der Messwerte um die Ausgleichsgerade kann natürlich auch durch Fehler in den Feldmessungen herrühren, da der Kronendurchmesser wesentlich schwieriger zu bestimmen ist als die Baumhöhe.

#### 4.3 Geometrische Rekonstruktion

Ausgehend von der unterteilten Punktwolke leiten wir die folgenden Größen ab:

- Baumposition: Schwerpunkt der Punktwolke eines *Clusters*,
- Baumhöhe: Maximum der  $z$ -Werte in einem *Cluster*,
- Baumvolumen: Berechnung über die konvexe Hülle der Punkte,
- Kronendurchmesser: Projizierte Fläche in der  $x, y$ -Ebene wird mit Hilfe des Zusammen-



**Abb. 10:** Geometrische Rekonstruktion des zuvor präsentierten Ausschnittes. Es wurden die Werte für Höhe, Position, Durchmesser und Höhe der Kronenunterkante in einem einfachen Modell unter Verwendung eines halben Rotationsparaboloids benutzt.

menhangs für die Kreisfläche in einen Durchmesser überführt und

- Kronenunterkante: 98% Percentil der tiefsten  $z$ -Werte der *Cluster*.

Unter Verwendung der oben aufgeführten Parameter und eines simplen geometrischen Modells können wir nun den Baumbestand rekonstruieren und visualisieren (Abb. 10). Die Baumkrone wird durch einen halben Rotationsparaboloid (eine Parabel als Einhüllende) dargestellt, der Baumstamm durch einen Zylinder, der allerdings für alle Bäume den gleichen Durchmesser hat. Diese Rekonstruktion kann jetzt zum Beispiel für Strahlungstransfermodelle benutzt werden, um die Invertierung von weiteren Forstparametern aus Hyperspektraldaten zu verbessern (KOETZ et al. 2004).

## 5 Zusammenfassung und Diskussion

Wir haben gezeigt, dass es mit einer Kombination aus Bildverarbeitung und Statistischen Analysen möglich ist, geometrische Informationen einzelner Bäumen automatisiert aus LIDAR-Rohdaten zu ermitteln, ohne dabei den Verlust von Information durch Interpolation in ein DOM in Kauf nehmen zu müssen. Sollten vom Anwender bestimmte Parameter auf größeren Skalen verlangt sein, so kann man die auf Einzelbäumen basierenden Werte einfach in einem größeren Raster zusammenfassen. Wir haben diesen Ansatz für Baumhöhen und Kronendurchmesser mit Feldmessungen validiert und zumindest für die Baumhöhen eine gute Übereinstimmung gefunden. Probleme bereitete die Zuordnung der Kronendurchmesser, so dass hier die Qualität der Regression bei weitem nicht so hoch ist wie für die Baumhöhen. Dieses liegt in erster Linie an der speziellen Vegetation im Schweizer Nationalpark, mit vielen eng zusammenstehenden Baumgruppen sowie einem großen Anteil – ca. 20% (DOBBERTIN et al. 2001) – von stehenden toten oder kranken Bäumen, welche nur noch über partielle Kronen verfügen. Allerdings muss an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen werden, wie feh-

leranfällig Messungen von Kronendurchmessern im Feld sein können. Wir scheinen in einem Bereich der Genauigkeit der Laserscanner angelangt zu sein, wo traditionelle Methoden der Forstinventur zur Bereitstellung von *ground truth* Information anscheinend nicht mehr ausreichend sind. Es stellt sich die Frage, inwiefern terrestrische Laserscanner hier weiterhelfen könnten. Erste Versuche mit Nahbereichsphotogrammetrie unter Verwendung einer Software des Fraunhofer Instituts für Computer Graphik (IGD) in Darmstadt erwiesen sich als nicht hilfreich, da Bäume zu komplexe Strukturen für die Rekonstruktions-Algorithmen darstellten. Als Verbesserungen der Algorithmik ließe sich eine Suche der Startpunkte direkt in den Rohdaten vorstellen, um zumindest einige der Baumgruppen als einzelne Bäume aufzulösen. Weiterhin werden wir den Algorithmus an einem gesunden Bestand mit größeren Kronendurchmessern testen, wo er noch bessere Ergebnisse liefern sollte.

## 6 Danksagung

Dieses Projekt wird durch das EU Projekt *Forest Fire Spread and Mitigation* (SPREAD), EU-Kontrakt Nr. EVG1-CT-2001-00027 und dem Schweizer Bundesamt für Bildung und Wissenschaft (BBW) finanziert; BBW-Contract Nr. 01.0138.

Wir danken STEPHAN HEINER für die Vermessung der Referenzflächen, sowie BENJAMIN KÖTZ und RUEDI HALLER für die Unterstützung bei der Feldarbeit. Ein spezieller Dank geht an TopoSys für die anhaltende Unterstützung und die technischen Informationen. Der Felddatensatz wurde vom Lang-Zeit Waldökosystem Forschungsprogramm LWF bereitgestellt; dies ist ein Partnerschaftsprojekt zwischen der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) und dem Bundesamt für Wald, Schnee und Landschaft (BVWAL).

## Literatur

- ANDERSEN, H.-E., REUTEBUCH, S.E. & SCHREUDER, G.F., 2002: Bayesian object recognition for the analysis of complex forest scenes in airborne laser scanner data. – ISPRS Commission III, Symposium 2002, September 9–13, Graz, Austria, pp. A–035 ff (7 pages).
- BALTSAVIAS, E.P., 1999: Airborne laser scanner: existing systems and firms and other resources. – ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing **54** (2–3): 164–198.
- BRANDTBERG, T., WARNER, T.A., LANDENBERGER, R.E. & MCGRAW, J.B., 2003: Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density LIDAR data from the eastern deciduous forest in North America. – Remote Sensing of Environ. **85** (3): 290–303.
- DOBBERTIN, M., BALTENSWELER, A. & RIGLING, D., 2001: Tree mortality in an unmanaged mountain pine (*Pinus mugo* var. *uncinata*) stand in the Swiss national park impacted by root rot fungi. – Forest Ecology and Management **145**: 79–89.
- DRAKE, J.B., DUBAYAH, R., KNOX, R.G., CLARK, D.B. & CONDIT, R., 2001: Relationship between LIDAR metrics and aboveground biomass in closed-canopy neotropical forests. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing **XXXIV**-3/W4: 147–154.
- DRAKE, J.B., DUBAYAH, R.O., CLARK, D.B., KNOX, R.G., BLAIR, J.B., HOFTON, M.A., CHAZDON, R.L., WEISHAMPEL, J.F. & PRINCE, S.D., 2002: Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint LIDAR. – Remote Sensing of Environ. **79**: 305–319.
- FILIN, S., 2002: Surface clustering from airborne laser scanning data. – ISPRS Commission III, Symp. 2002, September 9–13, Graz, Austria, pp. A–119 ff (6 pages).
- GAVEAU, D. & HILL, R., 2003: Quantifying canopy height underestimation by laser pulse penetration in small-footprint airborne laser scanning data. – Canadian Journal of Remote Sensing **29**: 650–657.
- HUBER, P., 1981: Robust Statistics. – Wiley, New York.
- HYYPPE, J., HYYPPE, H., INKINEN, M., ENGBAHL, M., LINKO, S. & ZHU, Y.-H., 1999: Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes. – Forest Ecology and Management **128**: 109–120.
- HYYPPE, J., KELLE, O., LEHIKONEN, M. & INKINEN, M., 2001: A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-d tree height models produced by laser scanners. – IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **39**: 969–975.

- KOETZ, B., SCHAEPMAN, M., BOWYER, P., MORS-DORF, F., ITTEN, K. & ALLGÖWER, B., accepted: Radiative transfer modeling within a heterogeneous canopy for estimation of forest fire fuel properties. – *Remote Sensing of Environment*.
- KRAUS, K. & PFEIFER, N., 1998: Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. – *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **53**: 193–203.
- MAAS, H.-G., 2000: Least-squares matching with airborne laserscanning data in a tin structure. – *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* **33** (3a): 548–555.
- MEANS, J.E., ACKER, S.A., FITT, B.J., RENSLOW, M., EMERSON, L. & HENDRIX, C., 2000: Predicting forest stand characteristics with airborne scanning LIDAR. – *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **66** (11): 1367–1371.
- MEANS, J.E., ACKER, S.A., HARDING, D.J., BLAIR, J.B., LEFSKY, M.A., COHEN, W.B., HARMON, M.E. & MCKEE, W.A., 1999: Use of large-footprint scanning airborne LIDAR to estimate forest stand characteristics in the western cascades of Oregon. – *Remote Sensing of Environment*. **67**: 298–308.
- NAESSET, E. & BJERKNES, K.-O., 2001: Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data. – *Remote Sensing of Environment*. **78**: 328–340.
- NAESSET, E. & OEKLAND, T., 2002: Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve. – *Remote Sensing of Environment*. **79**: 105–115.
- NILSSON, M., 1996: Estimation of tree heights and stand volume using an airborne LIDAR system. – *Remote Sensing of Environment*. **56**: 1–7.
- PERSSON, A., HOLMGREN, J. & SÖDERMAN, U., 2002: Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. – *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **68** (9): 925–932.
- POULIOT, D.A., KING, D.J., BELL, F.W. & PITT, D.G., 2002: Automated tree crown detection and delineation in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest regeneration. – *Remote Sensing of Environment*. **82** (2–3): 322–334.
- PYYSALO, U. & HYYPPAE, H., 2002: Reconstructing tree crowns from laser scanner data for feature extraction. – *ISPRS Commission III, Symposium 2002 September 9–13, Graz, Austria*, pp. B–218 ff (4 pp.).
- ROGGERO, M., 2001: Airborne laser scanning: Clustering in raw data. – *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* **XXXIV-3/W4**: 227–232.
- SCHARDT, M., ZIEGLER, M., WIMMER, A., WACK, R. & HYYPPAE, J., 2002: Assessment of forest parameters by means of laser scanning. – *ISPRS Commission III, Symposium 2002 September 9–13, Graz, Austria*, pp. A–302 ff (8 pp.).
- SPATH, H., 1985: Cluster Dissection and Analysis: Theory, FORTRAN Programs, Examples. – Halsted Press, New York, 226 pp.
- ST-ONGE, B.A. & ACHAICHA, N., 2001: Measuring forest canopy height using a combination of LIDAR and aerial photography data. – *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* **XXXIV-3/W4**: 131–137.
- VOSSELMAN, G., 2002: On the estimation of planimetric offsets in laser altimetry data. – *ISPRS Commission III, Symposium 2002, September 9–13, Graz, Austria*, pp. A–375 ff (6 pp.).

#### Anschriften der Autoren:

Dipl.-Oz. FELIX MORS-DORF  
e-mail: morsdorf@geo.unizh.ch

Dr. ERICH MEIER,

Prof. Dr. DANIEL NÜESCH,

Remote Sensing Laboratories, Department of Geography, University of Zurich

Dr. BRITTA ALLGÖWER, Geographic Information Systems, Department of Geography, University of Zurich

Manuskript eingereicht: Dezember 2003

Angenommen: Januar 2004



## Automatische Erfassung von Gebäudemodellen aus Laserscannerdaten und die Integration von Luftbildern

FRANZ ROTTENSTEINER, Sydney & CHRISTIAN BRIESE, Wien

**Keywords:** 3D building models, building extraction, data acquisition, LIDAR processing, multi-sensor processing.

**Zusammenfassung:** Es wird eine Methode zur automatischen Erzeugung dreidimensionaler Gebäudemodelle aus Laserscannerdaten vorgestellt. Nach der Gebäudedetektion werden in einem digitalen Oberflächenmodell ebene Dachflächen extrahiert, aus denen durch Gruppierung Polyedermodelle entstehen. Das Modell wird durch hybride Ausgleichung, gegebenenfalls unter Berücksichtigung geometrischer Bedingungen, verbessert. Es werden Möglichkeiten zur Integration von Luftbildern in den Prozess der Auswertung diskutiert. Die hier präsentierten Ergebnisse stammen von einem Testgebiet der Stadt Wien.

**Summary:** *Automatic generation of building models from LIDAR data and the integration of aerial images.* We present a method for the automated generation of 3D building models from LIDAR data. First, building regions are detected automatically. After that, roof planes are detected in a digital canopy model. These roof planes are grouped in order to create polyhedral building models. The model is improved by an overall adjustment considering geometric constraints where appropriate. The issue of integrating aerial images into the reconstruction process is discussed. Intermediate results are presented for a test site in the City of Vienna.

---

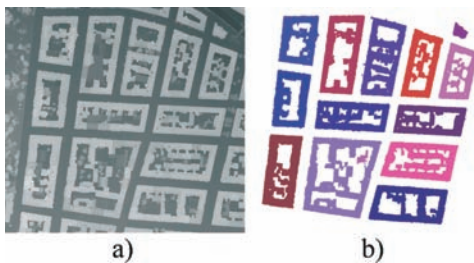
### 1 Einleitung

#### 1.1 Motivation und Zielsetzung

Mit flugzeuggetragenen Laserscannern können heute Punktwolken erfasst werden, die dicht genug sind, um die automatische Ableitung von dreidimensionalen Gebäudemodellen möglich zu machen. Dabei beschränkt sich die Automation nicht auf die Detektion von Gebäuden und deren Ränder, sondern man kann Modelle erzeugen, welche die Dachstruktur korrekt wiedergeben. Zu diesem Zweck werden oft bestehende Gebäudegrundrisse verwendet (BRENNER 2000, VOSSELMAN & DIJKMAN 2001), oder es kommen Algorithmen zur Anwendung, die auf gewissen Annahmen, z. B. der Rechtwinkeligkeit, aufbauen (VOSSELMAN 1999).

In dieser Arbeit soll eine Methode zur automatischen Ableitung von polyedrischen

Gebäudemodellen aus Laserscannerdaten vorgestellt werden, die ohne Grundrisse und ohne Annahmen über geometrische Bedingungen auskommt. In einem aus den Laserscannerdaten abgeleiteten digitalen Oberflächenmodell (DOM) werden ebene Dachflächen gesucht. Die Randpolygone dieser Dachflächen werden durch Verschneidung benachbarter Ebenen bzw. durch Detektion von Höhensprüngen verbessert. Anschließend werden die Gebäudeparameter durch hybride Ausgleichung in konsistenter Weise geschätzt. Möglichkeiten zur Integration von digitalen Luftbildern zur Verbesserung der Qualität der Gebäudemodelle werden ebenfalls diskutiert. Die hier präsentierten Ergebnisse stammen von einem Datensatz, der von TopoSys für die Gemeinde Wien erfasst wurde (Abb. 1a). Obwohl das vorzustellende Verfahren noch nicht vollständig



**Abb. 1:** Gebäudedetektion in der Stadt Wien. a) DOM (Rasterweite: 0.5 m, Ausdehnung: 410 m × 435 m); b) Gebäuderegionen.

implementiert wurde, zeigen diese bisherigen Ergebnisse doch sein Potenzial auf.

## 1.2 Bestehende Lösungsansätze

Die automatische Gebäudeextraktion beginnt mit der Detektion der Gebäude (ROTTENSTEINER & BRIESE 2002; Abb. 1). Anschließend werden die Gebäude geometrisch rekonstruiert. Dazu können in der Literatur zwei Strategien unterschieden werden. Einerseits kann das Interessensgebiet in rechteckige Regionen aufgeteilt werden, in denen man parametrische Primitive in die Daten einpasst (BRENNER 2000, VOSSELMAN & DIJKMAN 2001). Andererseits können ebene Dachflächen durch eine Segmentierung des DOM gefunden werden (BRENNER 2000), aus denen durch Gruppierung polyedrische Gebäudemodelle erzeugt werden. Auch in diesem Kontext werden oft Grundrissdaten verwendet (BRENNER 2000, VOSSELMAN & DIJKMAN 2001). VOSSELMAN (1999) beschreibt eine Methode zur geometrischen Rekonstruktion von Gebäuden nur aus Laserscannerdaten, wobei er aber nicht ohne Annahmen bezüglich der Orthogonalität der Wände auskommt.

Die Ergebnisse der Gebäudeextraktion können durch Kombination von Laserscannerdaten und Luftbildern verbessert werden (SCHENK & CSATHO 2002). AMERI (2000) erzeugt ebene Segmente durch Projektion der Ergebnisse einer Segmentierung im Bildraum auf ein DOM und verbessert die Genauigkeit der so erhaltenen Modelle durch Zuordnung von Gebäudekanten zu Grau-

wertkanten aus mehreren Bildern. Ein ähnliches Verfahren wurde von ROTTENSTEINER (2001) für die automatische Feinmessung von parametrischen Gebäudeprimitiven angewandt.

## 1.3 Systemübersicht und Arbeitsablauf

In dieser Arbeit wird nur die geometrische Rekonstruktion von Gebäuden behandelt. Außer für die Parameterschätzung wird das DOM durch ein Rastermodell repräsentiert, das aus den Laserscannerpunkten durch lineare Prädiktion mit einer Geraden als Kernfunktion abgeleitet wird (ROTTENSTEINER & BRIESE 2002). Der Abstand der Laserscannerpunkte betrug 0.1 m in bzw. 0.9 m quer zur Flugrichtung. Daraus wurde ein DOM mit einer Rasterweite von 0.5 m abgeleitet. Der Arbeitsablauf für die Gebäuderekonstruktion besteht aus vier Schritten:

1. *Detektion von Dachflächen* auf Basis einer Analyse der lokalen Variationen der Normalvektoren des DOM (Abschnitt 2).
2. *Gruppierung der Dachflächen und Modell-erzeugung*: Eine Klassifizierung der Stellung benachbarter Flächen zu einander im Raum liefert Information über Komplanarität, Schnittlinien und Höhensprünge. Es entsteht ein Modell der Dachlandschaft, das durch Wände und Boden vervollständigt wird (Abschnitt 3).
3. *Konsistente Schätzung der Modellparameter*: Die geometrischen Parameter der eben gewonnenen Polyedermodelle werden durch eine hybride Ausgleichung geschätzt.
4. *Modellregularisierung*: Hypothesen über geometrische Bedingungen zwischen Ebenen des Gebäudemodells werden erzeugt und in einer weiteren Ausgleichung berücksichtigt. Unser Ausgleichungsmodell wird in Abschnitt 4 vorgestellt.

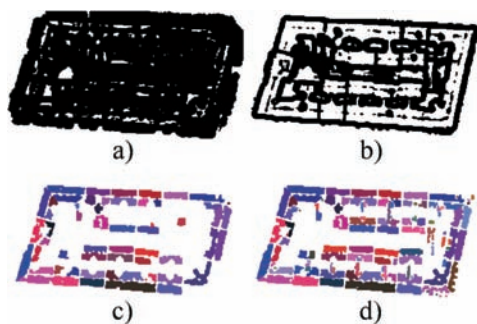
Der Detaillierungsgrad der Gebäudemodelle und die Lokalisierungsgenauigkeit der Höhensprünge sind durch die Auflösung der Laserscannerdaten limitiert. In Abschnitt 5 werden Ansätze diskutiert, wie diese Einschränkungen mit Hilfe von vergleichsweise

höheraufgelösten Luftbildern überwunden werden können.

## 2 Detektion von Dachflächen

FUCHS (1998) beschreibt eine Methode zur polymorphen Merkmalsextraktion, die auf eine Klassifikation der Textur eines digitalen Bildes als „homogen“, „linear“ oder „punktartig“ abzielt. Diese Klassifizierung kann auf einen statistischen Test des Quadrates des mittleren Grauwertgradienten in einer Umgebung eines Bildelementes zurückgeführt werden, wobei sich der Schwellwert für die Klassifizierung aus dem Signifikanzniveau des Tests ergibt. Wird diese Methode auf ein zweikanaliges Bild angewandt, dessen Kanäle die ersten Ableitungen des DOM nach X bzw. Y sind, können „homogene“ Pixel als in einem lokal ebenen Gebiet liegend interpretiert werden (Abb. 2a und 2b).

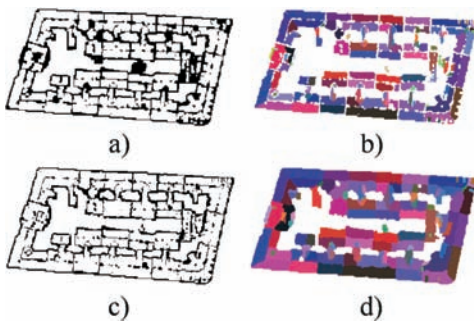
Die Detektion von Dachflächen erfolgt durch ein iteratives Verfahren. Zunächst wird die Texturklassifizierung mit einem sehr strengen Schwellwert (mit einem sehr hohen Signifikanzniveau) durchgeführt. Dadurch wird ein großer Prozentsatz fälschlicherweise als inhomogen klassifizierter Pixel und nur ein kleiner Prozentsatz irrtümlich als homogen klassifizierter Pixel zugelassen, sodass nur jene Gebiete als homogen klassifiziert werden, deren Planarität hoch signifikant ist. (Abb. 2a). Zusammenhän-



**Abb. 2:** Detektion von Dachflächen. a) und b) „homogene“ Pixel (weiß) für zwei Signifikanzniveaus; c) Ebenensegmente aus a) nach dem Bereichswachstum; d) endgültige Dachflächen-segmente.

gende Gebiete von homogenen Pixeln werden dann als Saatregionen für ein Bereichswachstumsverfahren ausgewählt, wenn die Ebenenausgleichung einen kleinen mittleren Gewichtseinheitsfehler ergibt. Neue Pixel in der Nachbarschaft eines Ebenensegmentes werden diesem zugeordnet, wenn der Abstand des 3D Punktes von der Ebene unter einem Schwellwert liegt. Dies wird so lange wiederholt, bis kein weiteres Pixel einem Ebenensegment zugeordnet werden kann. Abb. 2c zeigt das Ergebnis des Wachstums der Saatregionen aus Abb. 2a: Etwa die Hälfte der Pixel innerhalb des Gebäudes konnten bereits einem Ebenensegment zugeordnet werden. Nun wird die Klassifizierung der Textur mit einem größeren Schwellwert wiederholt, wodurch ein größerer Prozentsatz an fälschlich als homogen klassifizierten Pixeln zugelassen wird. Homogene Gebiete, die noch keinem Ebenensegment zugeordnet wurden, werden der eben beschriebenen Prozedur aus Selektion von Saatregionen und Bereichswachstum zugeführt, wodurch neue Ebenensegmente gefunden werden. Auf diese Weise werden mehrere Iterationen durchgeführt. Abb. 2d zeigt die so gefundenen Ebenensegmente. Es wurden 64 % der Pixel innerhalb der Gebäuderegion einem dieser Ebenensegmente zugeordnet. Der mittlere Gewichtseinheitsfehler der Ebenenausgleichung lag für alle Ebenen unter  $\pm 15$  cm.

Abb. 3a zeigt jene Pixel aus Abb. 2, die noch keinem Ebenensegment zugeordnet wurden. Die meisten dieser unklassifizierten Pixel findet man an den Rändern der Ebenensegmente, aber einige gehören entweder zu kleinen Dachstrukturen, die noch nicht extrahiert werden konnten, zu Strukturen auf den Dächern, die nicht eben sind (z. B. Dachgärten), oder zu Objekten, die gar kein Teil des Gebäudes sind (z. B. Bäume). Wir versuchen, zusätzliche Ebenensegmente in den unklassifizierten Gebieten zu finden und nicht zu den Gebäuden gehörende Objekte zu eliminieren. Zunächst suchen wir nach zusammenhängenden Gebieten von Pixeln mit einem kleinen Höhengradienten, um kleinere horizontale Ebenensegmente zu finden. Indem wir beim Bereichswachstum



**Abb. 3:** Nachbearbeitung der Segmentierung aus Abb. 2. a) Unklassifizierte Pixel; b) Ergebnis der Nachbearbeitung; c) Pixel, die keiner Ebene zugeordnet wurden; d) Voronoi-Diagramm nach der Vereinigung komplanarer Segmente.

größere Residuen zulassen, erhalten wir Segmente, die aus mehreren kleinen Ebenen bestehende Gebäudeteile generalisieren, eine Folge der beschränkten Auflösung der Laserscannerdaten. Schließlich eliminieren wir zusammenhängende Gebiete noch nicht klassifizierter Pixel, wenn sie einen großen Prozentsatz an „punktartigen“ Pixeln aufweisen, was ein Indikator für das Vorhandensein von Bäumen ist (ROTTENSTEINER & BRIESE 2002). Abb. 3b zeigt die endgültigen Dachflächen als Label-Bild, Abb. 3c die unklassifizierten Pixel nach der Eliminierung der verbleibenden Bäume. 69.9% aller Pixel in Gebäuderegionen werden einem Ebenensegment zugeordnet. 92.1% dieser Pixel (oder 64.4% aller Gebäudepixel) liegen in einem Segment mit einem mittleren Gewichtseinheitsfehler der Ebenenausgleichung unter  $\pm 15$  cm. Die verbleibenden 7.9% liegen in generalisierenden Segmenten.

### 3 Gruppierung der Dachflächen und Erzeugung der Randpolygone

Die Nachbarschaftsbeziehungen der ebenen Segmente werden aus einem Voronoi-Diagramm dieser Segmente abgeleitet (AMERI 2000): jedes unklassifizierte Pixel innerhalb des Gebäudes wird dem geometrisch nächstliegenden zugeordnet. Benachbarte komplanare Segmente werden vereinigt, wobei die Komplanarität mit einem Fisher-Test zum

Vergleich der mittleren Gewichtseinheitsfehler der Ebenenausgleichung unter Verwendung zweier Modelle (zwei Ebenen bzw. eine Ebene) getestet wird (Abb. 3d).

Die Nachbarschaftsbeziehungen der restlichen Dachflächen müssen weiter untersucht werden, um die Dachränder zu finden. Als erste Näherung für die Randpolygone dienen die Begrenzungen der Regionen im Voronoi-Diagramm (Abb. 4a). Jeder Abschnitt dieser Polygone, der zwei Dachflächen trennt, muss entsprechend der geometrischen Konfiguration dieser Flächen klassifiziert werden: sie können einander schneiden, es kann ein Höhengsprung auftreten, oder es liegen sowohl eine Verschneidung als auch ein Höhengsprung vor.

Für diese Klassifizierung müssen die Schnittlinien aller benachbarten Ebenensegmente berechnet werden. Es werden für jedes Ebenenpaar Abschnitte der ursprünglichen Kette von Kantenpixeln zwischen den Ebenen gesucht, deren mittlere quadratische Abweichung von der Schnittlinie unter einem Schwellwert liegt, die also zur Schnittgeraden passen. Wenn die gesamte Kantenpixelkette dieses Kriterium erfüllt, so stellt die Schnittgerade die tatsächliche Grenze zwischen den beiden Ebenen dar, und die ursprüngliche Kantenpixelkette ist durch ein Segment der Schnittgerade zu ersetzen. Ist dies nur für einen Teil der Kantenpixelkette der Fall, wird diese in mehrere Teile aufgespalten, wobei jeder Teil in der Folge individuell gehandhabt wird. Auch für jene Teile, die zur Schnittgeraden passen, wird die Kantenpixelkette durch ein Segment der Schnittgerade ersetzt. Für Kantenpixelketten oder deren Teile, die nicht zur Schnittgeraden passen, wird ein Höhengsprung angenommen. Um diesen zu lokalisieren, wird das relative Maximum der Komponente des Gradienten des DOM orthogonal zur Kantenpixelkette gesucht, wodurch man eine verbesserte Kantenpixelkette erhält. Kann diese durch eine Gerade approximiert werden, wird sie durch ein Geradensegment ersetzt, ansonsten wird sie durch ein Polygon approximiert. In der aktuellen Implementierung werden keine weiteren Versuche unternommen, dieses Polygon, das auf Grund

von Ausreißern sehr unregelmäßig sein kann, zu regularisieren.

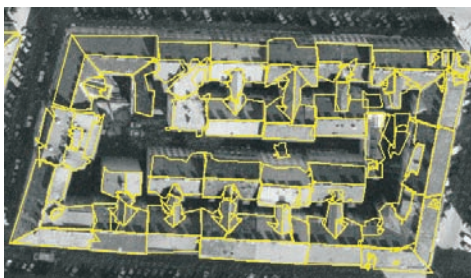
Sobald alle Abschnitte der ursprünglichen Kantenpixelketten entweder durch Segmente von Schnittgeraden oder durch Polygone an Höhengsprüngen ersetzt worden sind, werden die endgültigen Randpolygone der Dachflächen aus diesen Stücken zusammengesetzt. Wir berechnen alle Schnittpunkte benachbarter Geradenstücke oder Polygonsegmente. Liegt ein solcher Schnittpunkt in der Nähe der ursprünglichen Endpunkte dieser Segmente, wird er als Ecke des Randpolygons akzeptiert. Andernfalls werden die beiden ursprünglichen Ecken durch ein weiteres Geradenstück verbunden.

Nun können die Polyedermodelle erzeugt werden. Die Ecken der Randpolygone werden zu Ecken des Gebäudemodells, die Kanten der Randpolygone zu Gebäudekanten. Für jedes Polygonsegment eines Höhengsprunges muss eine vertikale Fläche, einer Wand entsprechend, in das Modell eingefügt werden.

Die Module zur Gruppierung und zur Modellgenerierung sind noch in der Implementierungsphase. Abb. 4b zeigt ein vorläufiges Ergebnis der Detektion von Schnittlinien und Höhengsprüngen. Letztere müssen in der Zukunft entweder durch die Elimination von Ausreißern oder durch neue Methoden der Ausdünnung verbessert werden. Da sich bei der Approximation der Dachpolygone durch Schnittgeraden und die Lage der Grenzen zwischen benachbarten Flächen ändert, können sich auch die Nachbarschaftsbeziehungen selbst ändern. Es wäre daher wünschenswert, auch die Untersu-



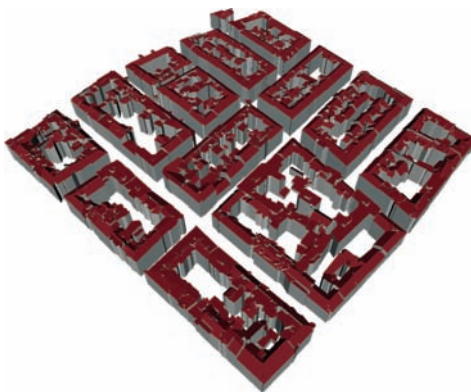
**Abb. 4:** Ausschnitt des DOM für das Gebäude aus Abb. 2 mit überlagerten Dachpolygonen. a) Die ursprünglichen Pixelketten aus Abb. 3d; b) nach der Detektion von Verschneidungen und Höhengsprüngen.



**Abb. 5:** Luftbild des Gebäudes in Abb. 2 mit Dachkanten. Pixelgröße am Boden: 15 cm.

chung der Nachbarschaftsbeziehungen und damit die Erzeugung der Randpolygone der Dachflächen in iterativer Weise durchzuführen.

Abb. 5 zeigt ein Luftbild im Maßstab 1:7000 mit überlagerten Dachpolygonen. Die Dachstruktur wird vom Modell gut wiedergegeben. Kleinere Details wie z. B. Rauchfänge konnten bei der gegebenen Auflösung der Laserscannerdaten nicht rekonstruiert werden. Jene Kanten, die Höhengsprüngen entsprechen, sind von den entsprechenden Kanten im Bild ca. 5 Pixel entfernt, was etwa der ein- bis eineinhalbfachen Rasterweite des DOM entspricht. Das etwas unruhige Aussehen einiger Polygonabschnitte wird durch unerkannte Ausreißer in der Lokalisierung von Höhengsprüngen verursacht. Abb. 6 zeigt eine Visualisierung eines 3D Modells, das aus vertikalen Prismen besteht, die durch die Randpolygone der Dachflächen definiert und durch den Bo-



**Abb. 6:** VRML-Visualisierung von vertikalen Prismen durch die Dachpolygone.

den bzw. die jeweilige Dachfläche begrenzt werden. Die Dachstruktur wird im Modell korrekt wiedergeben.

#### 4 Schätzung der Gebäudeparameter

Bisher wurden die Parameter der Ebenen des Gebäudemodells unabhängig voneinander bestimmt. Die Gebäudeecken wurden durch Verschneidung benachbarter Flächen oder durch die Lokalisierung von Höhengsprüngen berechnet. Eine Gesamtausgleichung unter Verwendung aller vorhandenen Daten ist wichtig, um geometrisch konsistente Gebäudemodelle zu erhalten und um geometrische Bedingungen berücksichtigen zu können. Für diese hybride Ausgleichung verwenden wir das Programm ORIENT (KAGER 1989).

Unser Ausgleichungsmodell beruht auf der Abbildung der Randdarstellung eines Gebäudes auf ein System von GESTALT-Beobachtungen, welches das Gebäudemodell und die ihm inhärenten Bedingungen in der Ausgleichung repräsentiert. Unter einer GESTALT-Beobachtung verstehen wir dabei Beobachtungen der Art, dass sich ein Punkt  $P$  auf einer Polynomfläche befindet. Die Parametrisierung dieser Fläche erfolgt in einem Beobachtungskoordinatensystem  $(u, v, w)$ , das mit dem Objektkoordinatensystem über eine Verschiebung  $P_0$  und drei Drehungen  $\Theta = (\omega, \varphi, \kappa)^T$  zusammenhängt. Die eigentliche Beobachtung ist eine fiktive Beobachtung der größten Komponente des Differenzvektors zwischen der Fläche und  $P$  mit dem Wert 0. Es sei  $p_R = (u_R, v_R, w_R)^T = R^T(\Theta) \cdot (P - P_0)$ , mit einer mit  $\Theta$  parametrisierten transponierten Drehmatrix  $R^T(\Theta)$ . Unter Beschränkung auf vertikale Ebenen für Wände und allgemeine Ebenen für Dächer können GESTALT-Beobachtungsgleichungen auf drei Arten formuliert werden:

$$\begin{aligned} r_u &= m_u \cdot u_R + a_{00} + a_{01} \cdot (m_v \cdot v_R) \\ r_v &= m_v \cdot v_R + b_{00} + b_{10} \cdot (m_u \cdot u_R) \\ r_w &= m_w \cdot w_R + c_{00} + c_{10} \cdot (m_u \cdot u_R) \\ &\quad + c_{01} \cdot (m_v \cdot v_R) \end{aligned} \quad (1)$$

In Gleichung 1 bezeichnet  $r_i$  die Verbesserung der fiktiven Beobachtung der Koordinate  $i$ , und die  $m_i \in \{-1, 1\}$  stellen die Spiegelungskoeffizienten dar. Eine Applikation kann frei darüber entscheiden, welche Parameter ( $P, P_0, \Theta$ , Flächenparameter  $a_{jk}, b_{ik}, c_{ij}$ ) in der Ausgleichung bestimmt werden sollen und wie eine Fläche zu parametrisieren ist. Weiters können sich mehrere GESTALTen auf die selben Transformations- und/oder Flächenparameter beziehen, was zur Modellierung geometrischer Bedingungen verwendet werden kann. Für die Gebäudeextraktion werden die Drehwinkel gleich 0 gesetzt und konstant gehalten.  $P_0$  liegt im Inneren des Gebäudes und ist ebenfalls konstant. Für jede Fläche der Randdarstellung des Gebäudes wird ein Satz von GESTALT-Beobachtungen definiert, wobei für Wände eine der ersten beiden Gleichungen 1 und für Dächer die dritte gewählt werden. Die Unbekannten der Ausgleichung sind die Objektkoordinaten der Gebäudeecken  $P$  und die Ebenenparameter ( $a_{jk}, b_{ik}, c_{ij}$ ). Da jede Gebäudeecke in mindestens drei Flächen enthalten ist, können ihre Objektkoordinaten immer aus den entsprechenden GESTALT-Beobachtungen bestimmt werden. Zur Bestimmung der Ebenenparameter müssen die Sensordaten herangezogen werden. *Laserscannerpunkte* werden den Dachflächen zugeordnet. Jeder Laserpunkt liefert eine GESTALT-Beobachtung und drei direkte Beobachtungen für die Objektkoordinaten des Punktes, führt aber auch zu drei unbekanntem Objektkoordinaten für  $P$ . *Direkte Beobachtungen* für die Koordinaten der Gebäudeecken an Höhengsprüngen machen die Parameter der Wände bestimmbar.

Das so entstehende Ausgleichungssystem ist hochredundant, sodass falsche Beobachtungen durch robuste Schätzung eliminiert werden können (KAGER 1989). Der wichtigste Parameter des stochastischen Modells ist die Standardabweichung a priori der GESTALT-Beobachtungen, durch die die „Starrheit“ des Gebäudemodells modelliert wird. Sie wird im Bereich von wenigen Zentimetern gewählt.

#### 4.1 Regularisierung der Polyedermodelle

Zukünftig sollen in der Ausgleichung geometrische Bedingungen berücksichtigt werden, wenn sich genügend Hinweise für ihr Vorhandensein finden. Erfüllen zwei Flächen  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  eine solche Bedingung, werden zusätzliche GESTALT-Beobachtungen in die Ausgleichung eingeführt, wobei diese Bedingungen durch spezifische Parametrisierung der Ebenen und geeignete Definition des Beobachtungskoordinatensystems modelliert werden. Abb. 7 zeigt drei mögliche Bedingungen. In allen Fällen fällt eine Achse des Beobachtungskoordinatensystems mit der Schnittkante der beiden Ebenen zusammen, und einer der Endpunkte der Schnittkante fungiert als Referenzpunkt  $P_0$ . Die Drehwinkel  $\omega$  und  $\varphi$  sind gleich 0 und konstant, für  $\kappa$  gibt es eine zusätzliche Unbekannte. Für jede Gebäudeecke  $v_i$  in einer der Flächen werden GESTALT-Beobachtungen für  $\varepsilon_1$  und/oder  $\varepsilon_2$  eingeführt. Die beiden Ebenen werden wie folgt parametrisiert:

- Horizontale Firstlinie:  $\varepsilon_1: r_w = w_R + c_{01}^1 \cdot v_R$  und  $\varepsilon_2: r_w = w_R - c_{01}^1 \cdot v_R$ . Es gibt nur eine unbekannte Dachneigung  $c_{01}^1$ . Symmetrie wird durch die Wahl von  $m_v = -1$  für  $\varepsilon_2$  erzwingen.
- Orthogonale Wände:  $\varepsilon_1: r_u = u_R, \varepsilon_2: r_v = v_R$ . Es gibt keine zusätzlichen Flächenparameter.
- Horizontale Traufenlinie:  $\varepsilon_1: r_w = w_R + c_{01}^1 \cdot v_R$  und  $\varepsilon_2: r_v = v_R$ . Es gibt eine zusätzliche Dachneigung  $c_{01}^1$ .

Das stochastische Modell der GESTALT-Beobachtungen zur Modellierung geometrischer Bedingungen wird durch ihre a priori

Standardabweichung beschrieben. Nach der Erzeugung der zusätzlichen Beobachtungen muss die Ausgleichung natürlich wiederholt werden.

### 5 Integration von Luftbildern

Größere Dachflächen können sehr gut aus den Laserscannerdaten abgeleitet werden, aber die Qualität dieser Ergebnisse wird durch die Auflösung dieser Daten beschränkt. Da die Auflösung von Luftbildern nach wie vor wesentlich besser als die von Laserscannern ist, sollen Luftbilder im Auswerteprozess berücksichtigt werden können. Dies kann in zwei Phasen erfolgen: Sie können helfen, zusätzliche Dachflächen zu finden, und sie können verwendet werden, um die geometrische Qualität der Position der Dachkanten durch Zuordnung von Modell- zu Bildkanten zu verbessern.

#### 5.1 Detektion von Ebenensegmenten

In Abschnitt 2 wurde beschrieben, dass wir Ebenensegmente akzeptieren, durch die aus kleineren Ebenen bestehende Dachstrukturen generalisiert werden. Es gibt auch Regionen, in denen keine Ebenen gefunden werden konnten. In beiden Fällen kann die Segmentierung unter Verwendung von Luftbildern verbessert werden.

Abb. 8 zeigt eines der „unklassifizierten“ Gebiete aus Abb. 3a sowie den entsprechenden Ausschnitt aus einem Luftbild und das Ergebnis einer Segmentierung dieses Bildes. Im DOM ist dieses Gebiet nur ca. 5 Pixel breit. Es ist nicht möglich, die beiden Dachflächen des Verbindungstrakts zu trennen, weil die Größe der detektierbaren Flächen

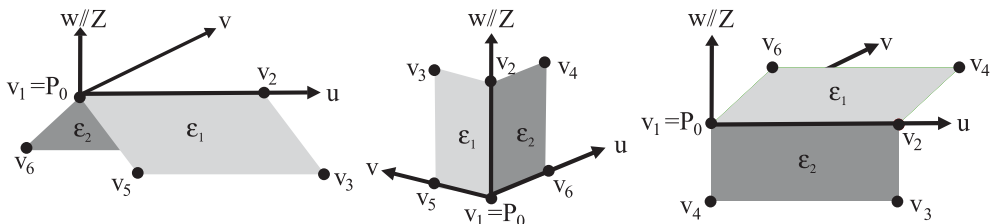
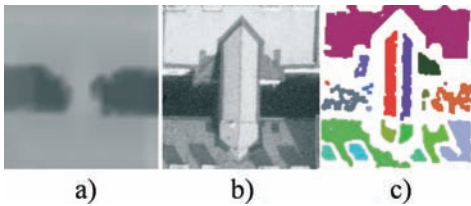


Abb. 7: Drei Beispiele für geometrische Bedingungen zwischen zwei Ebenensegmenten  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$ . Links: horizontale Firstlinie. Mitte: zwei orthogonale Wände. Rechts: horizontale Traufenlinie.



**Abb. 8:** a) Das DOM in einem der „unklassifizierten“ Gebiete aus Abb. 3a; b) Luftbild dieses Gebietes; c) Ergebnis einer Grauwertsegmentierung des Luftbildes.

durch die Größe der bei der Segmentierung verwendeten Filter beschränkt ist. Im Luftbild können die beiden Flächen aber sehr wohl getrennt werden. Abb. 8 zeigt, dass es sinnvoll ist, die Ergebnisse einer Grauwertsegmentierung der digitalen Bilder in Gebieten zu verwenden, in denen die Segmentierung des DOM aus Laserscannerdaten versagt. Die Ergebnisse der Segmentierung im Bildraum müssen auf das DOM projiziert werden, wodurch man eine erste Näherung für die Ebenenparameter bekommt. Außerdem ist es denkbar, homologe Segmente aus mehreren Bildern einander zuzuordnen. In der Zukunft werden wir die signifikantesten Segmente, die auf diese Weise gefunden werden (jene, die in mehreren Bildern gefunden werden) für die Modellbildung verwenden. Sie können entweder direkt in die Liste der Ebenensegmente hinzugefügt werden, oder sie können als neue Saatregionen für das Bereichswachstum in kritischen Gebieten angewandt werden.

### 5.2 Einpassung des Drahtgittermodells

Anders als in Laserscannerdaten, können die Gebäudeumrandungen in digitalen Luftbildern unter Voraussetzung eines guten Kontrastes sehr gut extrahiert werden. Die Drahtgittereinpassung basiert darauf, dass das aus Laserscannerdaten erzeugte Polyedermodell in die Luftbilder projiziert wird (Abb. 5), wodurch man in jedem Bild für jede Objektkante ein Interessensgebiet erhält, in dem Grauwertkanten, die ungefähr parallel zur Projektion der Objektkante verlaufen, als Kandidaten für eine Zuordnung zur

jeweiligen Objektkante gesucht werden. Diese Grauwertkanten werden in der Schätzung der Modellparameter durch eine Erweiterung des in Abschnitt 4 beschriebenen Modells der hybriden Ausgleichung berücksichtigt: Zusätzlich zu den dort beschriebenen Beobachtungen werden noch die Endpunkte von Bildkantensegmenten den Dachkanten des Modells zugeordnet, so dass man für jeden Endpunkt zwei Bildkoordinaten und zwei GESTALT-Beobachtungen (eine pro der Kante benachbarten Fläche) erhält. Zusätzlich gibt es drei unbekannte Objektkoordinaten.

Während die Suche nach Zuordnungskandidaten für alle Dachkanten und alle Bilder unabhängig erfolgt, erfolgt die Parameterschätzung in einer Gesamtausgleichung unter Verwendung der GESTALT-Beobachtungen, der Bildkoordinaten der Bildkantenendpunkte, der Laserscannerpunkte und der direkten Beobachtungen für die Punkte an den Höhengsprüngen. Robuste Schätzung wird zur Eliminierung falscher Zuordnungen herangezogen. Dieses Verfahren wurde zur automatischen Feinmessung von Gebäudeprimitiven in einem System für die halbautomatische Gebäudeextraktion entwickelt. In einem Test (Bildmaßstab 1:4500, sechsfache Überdeckung) konnten damit Genauigkeiten im Bereich von wenigen Zentimetern erreicht werden (ROTTENSTEINER 2001).

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Verfahren zur automatischen Ableitung von Gebäudemodellen aus hochauflösenden Laserscannerdaten vorgestellt. Vorläufige Ergebnisse aus dem Projektgebiet der Stadt Wien haben das Potenzial dieser Methode veranschaulicht. Es wurde auch die Thematik der Integration von digitalen Luftbildern in den automatischen Auswerteprozess diskutiert. Mit Hilfe einer solchen „Multisensorgrammetrie“ hoffen wir, noch bessere Resultate erzielen zu können. In der Zukunft sollen nicht nur die fehlenden Module der Methode implementiert, sondern auch Qualitätsparameter für die Ergebnisse dieser Methode abgeleitet werden.



## Danksagung

Diese Arbeit wurde vom österreichischen Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung im Rahmen des Forschungsprojektes P15789 und vom Australian Research Council im Rahmen des Discovery Project DP0344678 unterstützt.

## Literatur

- AMERI, B., 2000: Automatic Recognition and 3D Reconstruction of Buildings from Digital Imagery. – Dissertation, Univ. Stuttgart, DGK – C 526.
- BRENNER, C., 2000: Dreidimensionale Gebäude-rekonstruktion aus digitalen Oberflächenmodellen und Grundrissen. – Dissertation, Univ. Stuttgart, DGK – C 530.
- FUCHS, C., 1998: Extraktion polymorpher Bildstrukturen und ihre topologische und geometrische Gruppierung. – Dissertation, Univ. Bonn, DGK-C 502, München.
- KAGER, H., 1989: ORIENT: A Universal Photogrammetric Adjustment System. – In: GRÜN, A. & KAHMEN, H. (Hrsg.): Optical 3-D Measurement. – pp. 447–455, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe.
- ROTTENSTEINER, F., 2001: Halbautomatische Gebäudeauswertung durch Integration von hybrider Ausgleichung und 3D Objektmodellierung. – PFG 2001 (4): 289–301.
- ROTTENSTEINER, F. & BRIESE, C., 2002: A new Method for Building Extraction in Urban Areas from High-Resolution LIDAR Data. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and SIS 34 (3A): 295–301.
- SCHENK, T. & CSATHO, B., 2002: Fusion of LIDAR Data and Aerial Imagery for a more Complete Surface Description. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and SIS 34 (3A): 310–317.
- VOSSELMAN, G., 1999: Building Reconstruction Using Planar Faces in Very High Density Height Data. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 32 (3-5W2): 87–92.
- VOSSELMAN, G. & DIJKMAN, S., 2001: 3D Building Model Reconstruction from Point Clouds and Ground Plans. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 33 (3-W4): 37–43.

### Anschriften der Verfasser:

Dipl.-Ing. Dr. FRANZ ROTTENSTEINER  
School of Surveying and Spatial Information  
Systems, University of New South Wales, Sydney,  
NSW 2052, Australia  
Tel.: +61 2 9385 4186  
Fax: +61 2 9313 7493  
e-mail: f.rottensteiner@unsw.edu.au

Dipl.-Ing. CHRISTIAN BRIESE  
Institut für Photogrammetrie und Fernerkun-  
dung, TU Wien, Gußhausstraße 27–29, A-1040  
Wien, Tel.: +43 1 58801 12211  
Fax: +43 1 58801 12299  
e-mail: cb@ipf.tuwien.ac.at

Manuskript eingereicht: Dezember 2003  
Angenommen: Januar 2004



## Filterung segmentierter Oberflächenmodelle aus Laserscannerdaten

PETER LOHMANN & KARSTEN JACOBSEN, Hannover

**Keywords:** laser scanning, filtering, segmentation of point clouds

**Summary:** *Filtering of segmented situation models from laser scanner data.* The filtering of a digital situation model (DSM) containing points located on vegetation and buildings to a digital height model (DHM) of the bare ground is depending upon the structure of the objects not belonging to the bare ground. The limitation of an automatic global filtering of a DSM as a compromise between the different object classes is shown. Based on an automatic segmentation for each different class the required filter thresholds could be determined automatically for reaching an optimal filter result.

**Zusammenfassung:** Die Verfahren zur Filterung (Elimination) von Vegetations- oder Gebäudehöhen aus Digitalen Oberflächenmodellen (DOM) zur Erstellung eines Digitalen Höhenmodells (DHM) der Erdoberfläche sind abhängig von der Struktur der Objekte, die nicht zum Gelände gehören. Eine Einschränkung bei der automatischen Filterung besteht in der Gleichbehandlung der verschiedenen Objektklassen. Aufbauend auf einer automatischen Segmentierung der Daten wird gezeigt, dass eine Ableitung von Schwellwerten und Filterparametern basierend auf Segmenten zu optimalen Ergebnissen bei der Filterung führt.

### 1 Einleitung

Die Anwendung von Verfahren zur Erzeugung digitaler Oberflächenmodelle (DOM), wie die automatische Bildzuordnung oder das Laserscanning, hat den Nachteil, dass nicht die gewünschte reine Geländeoberfläche erreicht wird, sondern die sichtbare Oberfläche einschließlich Vegetation und Gebäuden. Eine Reihe von Filtertechniken ist bisher entwickelt worden, um diese „Artefakte“ zu beseitigen und ein echtes Digitales Höhenmodell (DHM) zu erzeugen (LOHMANN et al. 2000). Bei allen Verfahren hängt jedoch die Qualität des erzielten Ergebnisses von der geeigneten Wahl der Schwellwerte oder Steuerparameter ab (PASINI et al. 2002, KRAUS 1997, VOELZ 2001). Daraus folgt, dass abhängig von der Art der Filterung, unterschiedliche, der Geländestruktur (Landnutzung) angepasste Einstellwerte bzw. Schwellwerte gewählt werden sollten.

Dies erfordert die Segmentierung eines DOM in Gebiete gleicher Eigenschaften, um die Leistungsfähigkeit der Filtermethoden zu optimieren.

### 2 Segmentierung eines DOM

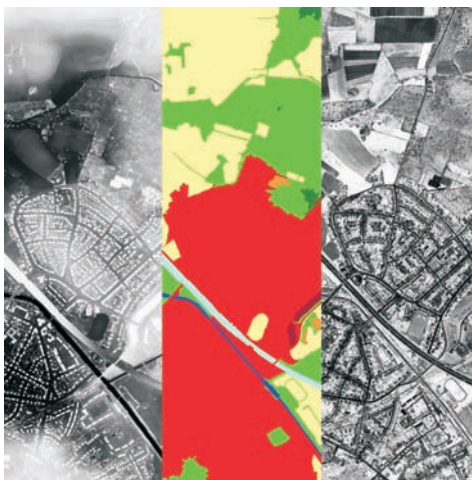
Die Segmentierung eines DOMs, welches mittels Bildzuordnung oder Laserscanning gewonnen wurde, sollte mit Klassen erfolgen, die möglichst allgemein beschrieben werden können, um eine Übertragbarkeit des Segmentierungsansatzes auf andere Datensätze zu erlauben. Solche einfachen Landnutzungsklassen können in der Regel leicht von geschulten Interpreten aus optischen Bildern extrahiert werden. Bei modernen Laserscannersystemen ist es möglich, neben der Höheninformation auch ein Bild der Geländereflexion aufzuzeichnen und dieses für eine Segmentierung zu verwenden.

Es konnte gezeigt werden (BAATZ & MIMLER 2002), dass Softwareprogramme, wie

Definiens *eCognition* in der Lage sind, zufrieden stellende Segmentierungen von hoch auflösenden Fernerkundungsbildern zu erstellen. Die eingesetzte Methode benutzt dabei ein hierarchisches Netzwerk von Bildobjekten, sowie eine Menge von vom Nutzer definierbaren Regeln, die nicht nur den Bildelementwert gewichten, sondern auch Merkmale, wie Form und Topologie. Diese Software wurde in der hier vorliegenden Untersuchung zur Segmentierung genutzt.

## 2.1 Segmentierung eines Laserscanner-Datensatzes

Der untersuchte Datensatz wurde von der Firma TOPSCAN zur Verfügung gestellt, welche die Laserbefliegung im Auftrag der Emscher Genossenschaft im Gebiet „Ickern/Waltrop“ in der Nähe von Castrop Rauxel in Nordrhein Westfalen durchführte. Hierbei kam der OPTECH ALTM 1225 Laserscanner im „First/Last Pulse“ Modus mit Aufzeichnung eines Intensitätsbildes der Laserreflexionen zum Einsatz. Abb. 1 (links) zeigt die „last pulse“ Höhen als Grauwertbild gemeinsam mit dem Segmentierungsergebnis (Mitte) und dem Reflexionsbild im rechten Teil der Abbildung. Die Messpunktdichte beträgt 0,6 Punkte pro m<sup>2</sup>. Dieser Datensatz wurde für die Untersuchungen zur

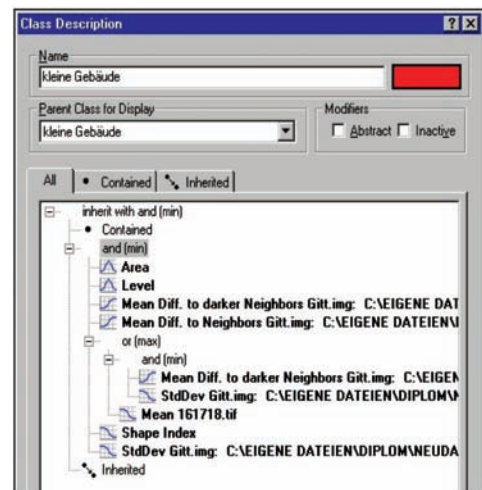


**Abb. 1:** Segmentierungsergebnis (Links: Grauwertbild der Höhen, Mitte: Segmentierung, Rechts: Intensitätsbild).

Filterung herangezogen, indem eine Segmentierung in 8 allgemeine Klassen, hergestellt aus dem Höhenbild allein oder in Kombination mit dem Intensitätsbild zugrunde gelegt wurde.

Das hierarchische Netz in *eCognition* wurde aus 3 Ebenen aufgebaut und die wählbaren Segmentierungs-Parameter so gesetzt, dass visuell das beste Ergebnis erreicht wurde (LOHMANN 2002).

Die unterschiedlichen Ebenen wurden in Übereinstimmung mit üblichen Interpretationsregeln erzeugt. So sollen zum Beispiel in Ebene 1 die Segmentgrenzen mit den Gebäudekanten übereinstimmen, um die Klassifizierung einzelner Gebäude zu erlauben. Damit ist das Objekt „Gebäude“ das wesentliche Element, um die Parameter der Ebene 1 zu definieren. Gebäude können visuell am besten durch eine hellere Farbe (Höhe) von ihrer Nachbarschaft unterschieden werden. Damit ist das Gewicht für den „Farbwert“ in dieser Ebene deutlich größer als das des Parameters „Form“ (Shape). Durch gleichartige Überlegungen können die anderen Segmentierungsparameter gefunden werden. Die grundlegenden Merkmalsbeschreibungen (Abb. 2 und Tab. 1) dienen dazu die Objekte in jeder Ebene zu definieren und sie in der nächsten höheren Ebene zur gewünschten Ausgabeklasse zu aggregieren.



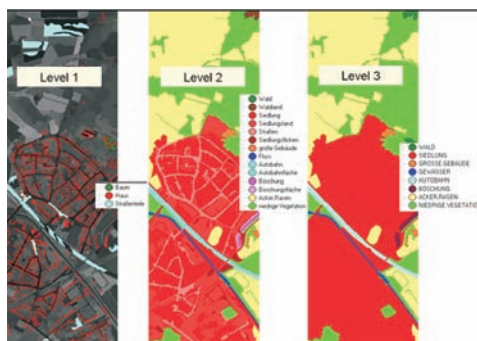
**Abb. 2:** Klassenbeschreibung in *eCognition*.

**Tab. 1:** Tabelle der Objektbeschreibung „Kleine Gebäude“ in Ebene 1.

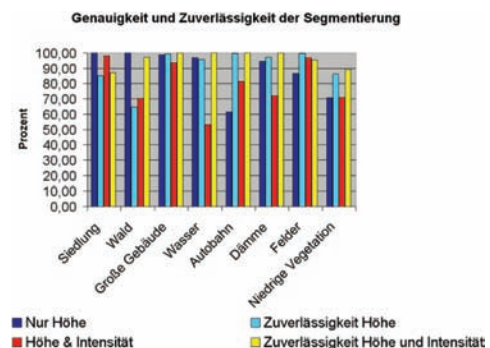
<b>Kleine Gebäude</b>		Diese Klasse dient als Ansatz zur späteren Klassifizierung von Siedlungsflächen. Ziel ist es hier Gebäude wie Einfamilienhäuser oder kleinere Wohnblocks zu klassifizieren. <b>Dazu werden folgende Merkmale benutzt:</b>
Fläche		Zugelassen sind nur Segmente zwischen 80 Pixel (m <sup>2</sup> ) und 2000 Pixel. Dieses Merkmal definiert die maximale Größe eines kleinen Gebäudes.
Mittlere Differenz zu dunkleren Nachbarn (Höhe)		Dieses Merkmal unterstützt die Eigenschaft, dass das umliegende Gelände des Gebäudes tiefer liegt und damit dunkler erscheint.
Mittl. Diff. zu Nachbarn (Höhe)		Es sollen mehrheitlich dunklere (tiefere) Nachbarsegmente vorhanden sein.
or	and	Wenn der mittlere Grauwert des Intensitätskanals vegetations-typische Werte (höhere Grauwerte) liefert, dann schützt das Merkmal Grauwertstandardabweichung der Höhe vor einer Verwechslung mit Wald. Die Gebäudeklassifikation von Vegetationsflächen wird von der Bedingung „viel dunklere Nachbarsegmente“ unterstützt.
	Mittl. Diff. zu dunkleren Nachbarn (Höhe)	
	Std. Dev. (Höhe)	
	Mean (Grauwert-mittelwert Intensität)	
Shape Index (Form)		Die glatte Geometrie der Gebäudeumrisse wird hier genutzt. Randlänge des Segments geteilt durch seine Fläche. Ein Wert unter 2.6 wird verlangt.
Std. Dev. (Standardabweichung der Höhe)		Diese Funktion gehört zur Statistik der Texturanalyse 1.Ordnung. Es wird eine Standardabweichung des Mittels der Grauwerte im Segment berechnet. Die im Vergleich zum Wald glatte Oberfläche der Gebäude wird hier berücksichtigt.

So beginnt z. B. die Klasse „Siedlung“ in Ebene 3 mit der Ableitung von „kleinen Gebäuden“ in Ebene 1, die zu „Gebäudeblöcken“, „Wohneinheiten“ inklusive „Straßen“, „Hinterhöfe“ und „Reihenhäuser“ in Ebene 2 aggregiert werden.

Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Segmentierung und Klassifizierung wurde durch Vergleich mit einer Interpretation eines geübten Luftbildinterpreten ermittelt und ist in Abb. 4 dargestellt.



**Abb. 3:** Verschiedene Aggregationsebenen im Laufe der Segmentierung.



**Abb. 4:** Klassifizierungs-/Segmentierungsgenauigkeit und -Zuverlässigkeit.

Wie zu sehen ist, steigt die Genauigkeit durch das Hinzunehmen des Intensitätskanals in der Segmentierung nicht signifikant an, aber die Zuverlässigkeit der erzeugten Klasse nimmt zu. Im Vergleich zu der manuellen Interpretation fällt hingegen auf, dass insbesondere kleine flächenhafte Objekte, wie Bäche oder Gräben nicht erkannt wurden. Daher wurde das Ergebnis (Abb. 3) manuell editiert, bevor die Filterparameter und Schwellwerte für die Segment bezogene Filterung gewählt wurden.

### 3 Filterung des Digitalen Oberflächenmodells zu einem Digitalen Höhenmodell

Für die Filterung vom DOM in ein DHM wurde in der Universität Hannover das Programm RASCOR entwickelt (JACOBSEN 2001, JACOBSEN & PASSINI 2001). RASCOR bestimmt die für die Filterung erforderlichen Parameter mittels einer Analyse des DOM. Ein Problem stellen die für verschiedene Geländetypen unterschiedlichen Filterparameter dar. Ohne eine Unterscheidung nach Geländetypen können nur mittlere Parameter vom Programm ermittelt werden, die nicht immer zu optimalen Ergebnissen führen. Das beschriebene Gelände wurde zuerst ohne Berücksichtigung der Objektklassen gefiltert. Die Schnellstraße, zwei Wasserläufe und eine Halde wurden durch Bruchkanten spezifiziert um eine nicht beabsichtigte Entfernung von Punkten an diesen zu vermeiden.

Durch die Filterung sollten alle Punkte, die nicht auf dem Boden liegen, entfernt

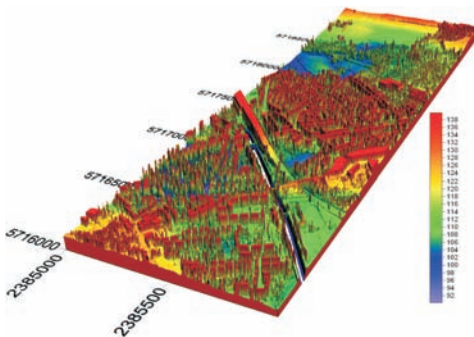


Abb. 5: 3-D-Blick auf das benutzte DOM.

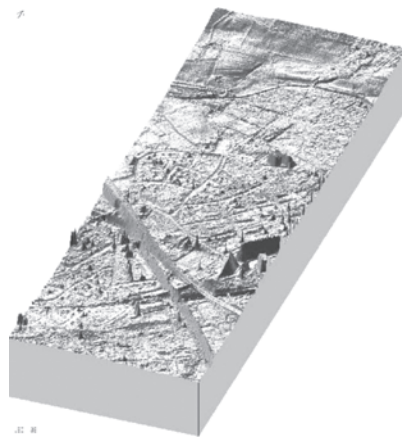


Abb. 6: Gelände nach einer globalen Filterung.



Abb. 7: Ergebnis der Filterung – weiß = entfernte oder nicht vorhandene Punkte.

werden um ein DHM zu erhalten. 37% der DOM-Punkte wurden durch die globale Filterung entfernt (siehe Abb. 5 und 6). Einige Bäume und Gebäude an der Gebietsgrenze sind auch nach der Filterung erhalten geblieben. Ohne Verwendung von Bruchkanten wurde eine größere Anzahl von Bodenpunkten an den Dammschultern und oberen Teilen der Einschnitte entfernt.

### 3.1 Filterung durch RASCOR

Das Programm RASCOR verwendet eine Kombination verschiedener Methoden zur Filterung des DOM, das eine rasterförmige Punktanordnung haben muss. Für die Filterung von DOMs mit einer zufälligen Punktanordnung steht das Hannoversche Programm DTMCOR zur Verfügung, das auf einer Prädiktion basiert. Die praktische Erfahrung zeigte, dass DOMs mit zufälliger Punktanordnung in eine rasterförmige Anordnung umgerechnet werden können und danach mit RASCOR zu filtern sind, ohne dass dieses zu einem Informationsverlust führt. Für den untersuchten Datensatz war diese Umrechnung nicht erforderlich, da die Daten bereits rasterförmig vorlagen.

RASCOR startet mit einer Analyse der Höhenverteilung. In weitgehend ebenem Gelände werden eine Ober- und eine Untergrenze der zu akzeptierenden Punkte bestimmt. Es folgt eine Untersuchung der Höhenunterschiede benachbarter Punkte. Die automatisch ermittelte Toleranzgrenze für den Höhenunterschied benachbarter Punkte ist von der Geländeneigung und den zufälligen Punktfehlern abhängig. Mit dieser Methode lassen sich nur kleine Objekte und die Grenzen größerer Objekte aus dem Datensatz entfernen; trotzdem wird hiermit in der Regel bereits ein größerer Anteil der Nichtbodenpunkte identifiziert und entfernt.

In durch Laserscanner erstellten DOMs können größere Gebäude durch eine plötzliche Höhenänderung und eine in einem Abstand folgende umgekehrte Höhenänderung innerhalb eines Profils identifiziert werden. Diese Methode wirkt nur eingeschränkt, wenn die Höhen durch eine automatische

Bildzuordnung bestimmt wurden, da diese zu hügelartigen Gebäuden führt.

Andere, nicht zum Boden gehörende Objekte, lassen sich durch eine Profilanalyse bestimmen. Es hat sich die Kombination eines kürzeren wandernden Profils mit einem längeren bewährt. Die erforderlichen Profillängen und korrespondierenden Toleranzgrenzen werden durch Analyse einer Reihe kürzerer und längerer Profile vom Programm ermittelt. In flachem Gelände werden die individuellen Punkte gegen den Mittelwert im Profil geprüft, in bewegtem Gelände erfolgt eine Anpassung an das Gelände durch eine geneigte Gerade und im Bergland durch ein Polynom. Diese Methode ist mit einem Datasnooping kombiniert um Datenlücken durch bereits entfernte Punkte richtig berücksichtigen zu können. Die Profile werden in X- und Y-Richtung analysiert. Es schließt sich eine Untersuchung mittels einer bewegten Ebene an, die je nach Geländetyp horizontal oder geneigt ist oder im Gebirge durch eine Polynom-Anpassung ersetzt wird. Die Größe der bewegten Ebene wird vom Programm durch Analyse einer Anzahl von verschiedenen großen Ebenen festgelegt. Eine anschließende Prädiktion führt in der Regel nicht zu einer beachtenswerten Anzahl von zu entfernenden Punkten.

Überschreitet ein Höhenunterschied benachbarter Punkte die Toleranzgrenze, wird der höher gelegene entfernt. Die anderen Schritte sind mit einem wählbaren Gewichtungsfaktor für tiefer gelegene Punkte verbunden. Dadurch werden Einschnitte und Wasserläufe unverändert gelassen. Durch Laserscanner bestimmte DOMs enthalten in der Regel nur Nichtbodenpunkte, die oberhalb der Erdoberfläche liegen. Dagegen können durch Bildzuordnung bestimmte DOMs auch Fehlkorrelationen enthalten, die zu Punkten unterhalb der Erdoberfläche führen, was die Einführung eines Gewichtungsfaktors rechtfertigt.

In Waldgebieten werden im ersten Schritt nur die auf Bäumen liegenden Punkte entfernt. Auf niedrigerer Vegetation liegende Punkte werden erst mit einer zweiten Iteration entfernt. In anderen Fällen kann eine

zweite Iteration zu einer stärkeren Generalisierung des Höhenmodells führen. Für die Generierung von Höhenlinien mag dieses erwünscht sein, es führt aber nicht zu einer optimalen Beschreibung des Geländes.

### 3.2 Filterung individueller Segmente

Wird die Filterung für die einzelnen Segmente separat durchgeführt, werden automatisch vom Programm unterschiedliche, angepasste Toleranzgrenzen ermittelt, die das digitale Oberflächenmodell besser als mittels der globalen Filterung überarbeiten können.

#### Siedlungen und große Gebäude

Siedlungen und große Gebäude wurden mit der Standardvorgehensweise des Programms optimal gefiltert. Hierfür waren zwei Iterationen erforderlich. Die erste Iteration entfernt die Gebäude, jedoch nicht die niedrige Vegetation und kleinere Objekte. Mit der zweiten Iteration wird auch dieses entfernt (Abb. 8). Große Industriegebäude werden mit der Profilooption – plötzlicher Sprung nach oben und später ähnlicher Sprung nach unten – identifiziert. Insgesamt wurden 60% der Punkte im Siedlungsgebiet als nicht zur Geländeoberfläche gehörend entfernt.

#### Schnellstraßen

Schnellstraßen und Eisenbahnlinien liegen häufig auf Dämmen oder in Einschnitten. Durch eine generelle Filterung werden besonders die oberen Böschungsschultern

reduziert. Werden diese linienhaften Objekte gesondert gefiltert, verbessert sich das Ergebnis. Es verbleiben jedoch noch Probleme im Bereich der Böschungsschultern. RASCOR kann diese Bereiche mit besseren Ergebnissen gesondert filtern, optimale Ergebnisse werden jedoch durch Einführung von Bruchkanten erzielt.

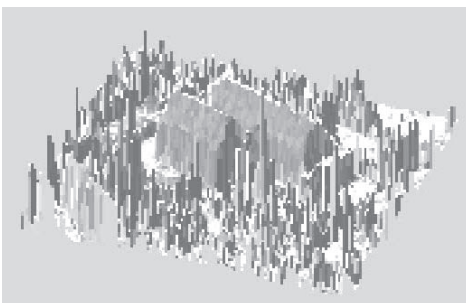
Abb. 10 zeigt, dass Bäume und Büsche problemlos entfernt werden, aber auch die Böschungsschultern beeinträchtigt sind. Eine Standardfilterung entfernt in dem gezeigten Beispiel 21,6% der Punkte. Die Einführung von Bruchkanten reduziert die Anzahl der entfernten Punkte auf 10,4% und lässt den Damm unbeeinflusst.

#### Böschungen und Einschnitte

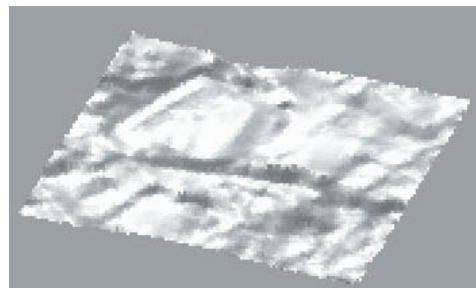
Böschungen und Einschnitte zeigen ähnliche Probleme wie die Durchgangsstraßen. Sie können durch eine gesonderte Filterung oder auch mittels Bruchkanten optimal bearbeitet werden.

#### Wasserläufe

Durch Totalreflexionen auf Wasseroberflächen ist von diesen meistens keine Höheninformation verfügbar, so dass sie von den Uferlinien aus interpoliert werden müssen. Typisch für Wasserläufe sind Böschungen und parallele Dämme. Einschnitte verursachen keine Probleme da sie von RASCOR besonders behandelt werden, anders sieht es mit begleitenden Dämmen aus, die als solche bearbeitet werden sollten. Abb. 11 zeigt bei der Standardfilterung eine Beeinträchti-



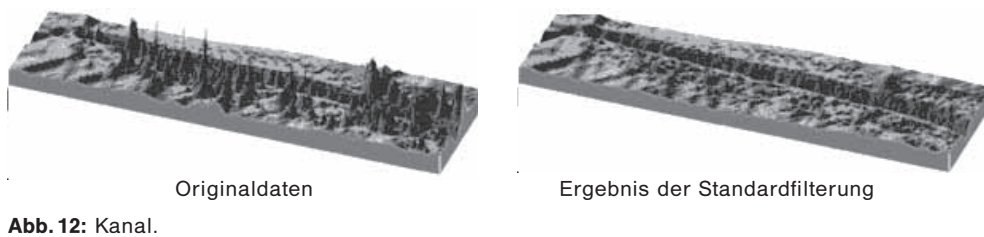
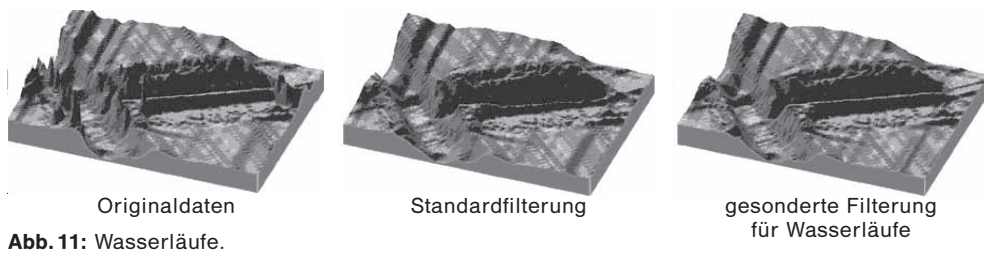
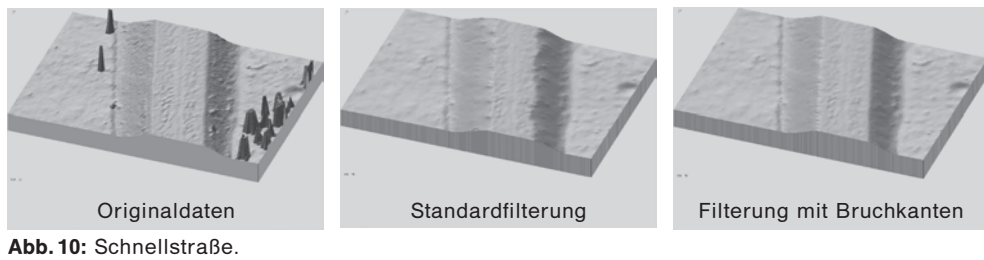
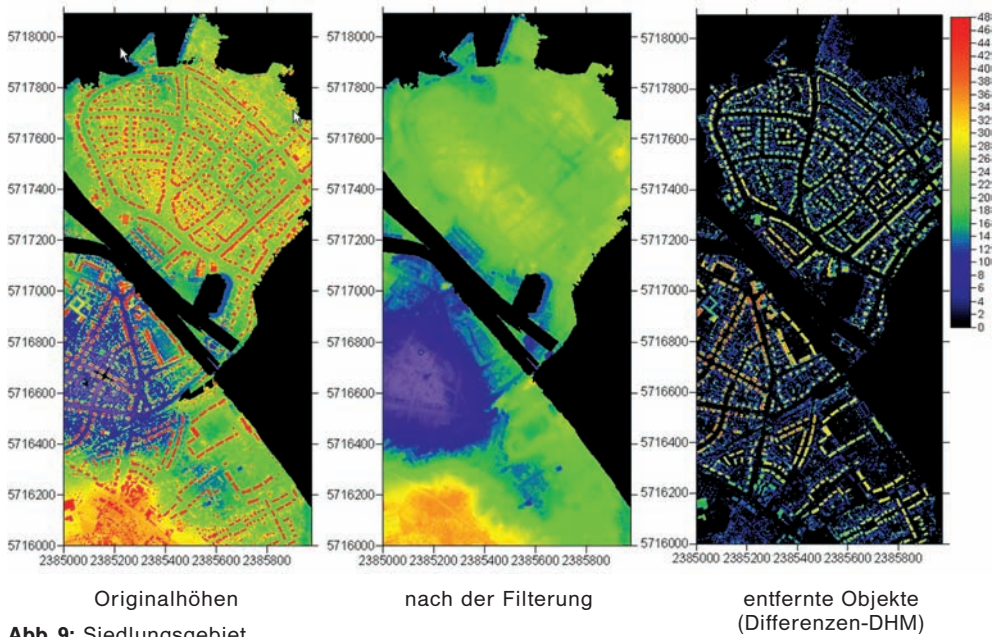
Gebäude mit umliegender Vegetation



DHM nach Filterung mit 2 Iterationen

**Abb. 8:** DOM eines Gebäudes mit Umgebung vor und nach der automatischen Filterung.





gung des begleitenden Dammes (Mitte, unten), die durch die gesonderte Filterung nicht vorhanden ist. Ähnlich sieht das Ergebnis einer Filterung mit Bruchkanten aus.

Kanäle haben eine ähnliche Struktur wie natürliche Wasserläufe. Der in dem untersuchten Datensatz vorhandene Kanal hat keine begleitenden Dämme und nur eine eingeschränkte Anzahl von Vegetationselementen. Dementsprechend ergaben sich keine Probleme mit der Standardfilterung (Abb. 12).

### Brücken

Brücken zeigen abrupte Höhenänderungen ohne Böschung. Wenn die Brücken als gesonderte Segmente vorhanden sind, werden sie selbstverständlich nicht beeinträchtigt, da alle Punkte auf den Brücken liegen. Trotzdem ist es besser, die Brücken mittels Bruchkanten als durch gesonderte Segmente zu erfassen. Die Bruchkanten können auch die benachbarten Dämme enthalten, was zu einer vereinfachten Bearbeitung führt. Eine Einführung von Bruchkanten führt zu keinem Informationsverlust gegenüber den Originaldaten, während eine globale Filte-

rung die Brücken und auch in der Nachbarschaft vorhandene Dämme beeinträchtigt (Abb. 13).

### Grasflächen

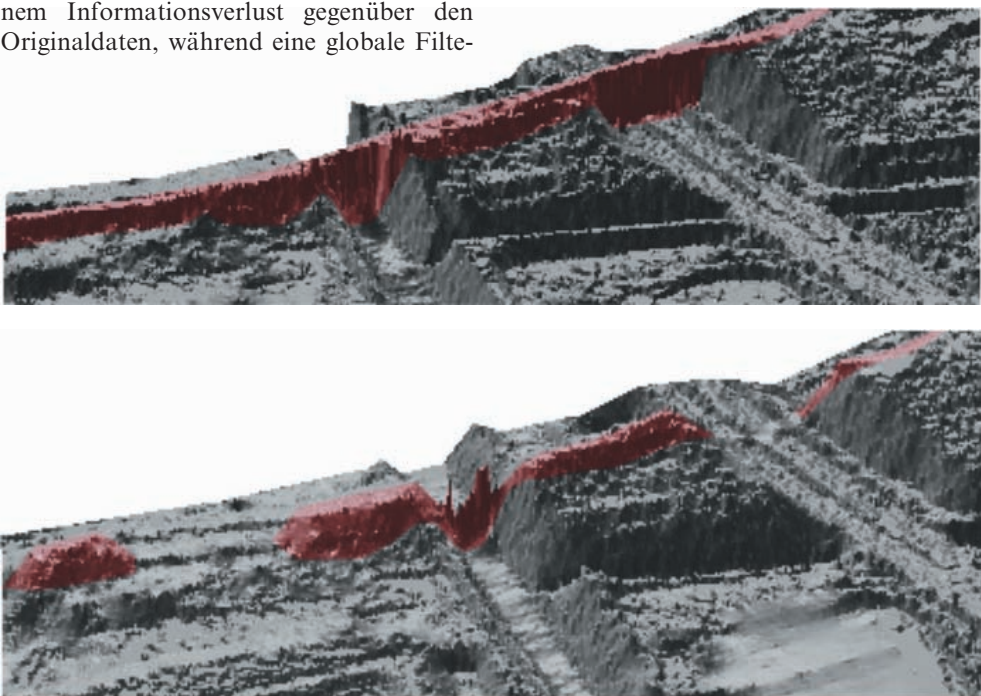
Wiesen und Weiden sind einfache Segmente, sie enthalten neben wenigen Büschen und Bäumen kaum Objekte, die nicht zur Geländeoberfläche gehören. Dementsprechend können sie ohne Probleme mit einer globalen Filterung optimal bearbeitet werden.

### Vegetation

Unter Vegetation ist die Mischung von Grasflächen mit Büschen zu verstehen. Dieses konnte, wie die Grasflächen, mit der globalen Filterung problemlos bearbeitet werden.

### Forst

Die globale Filterung erfolgte nur mit einer Iteration um Dämme nicht zu stark zu beeinflussen. Für die Forstgebiete sollten je-



**Abb. 13:** Brücken. oben: Originaldaten, unten: Ergebnis der Standardfilterung (eine Iteration)

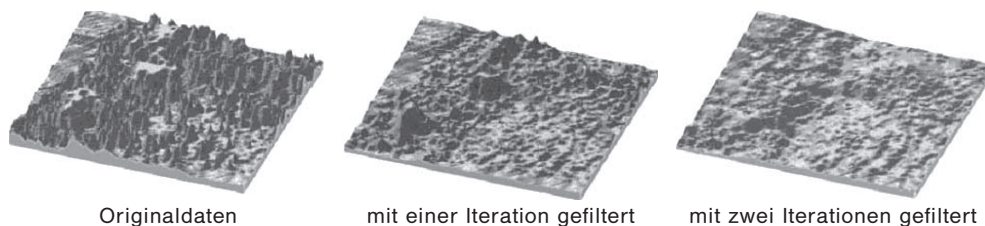


Abb. 14: Forst.

doch zwei Iterationen benutzt werden, da in der ersten Iteration nur die großen Bäume entfernt werden, kleinere Bäume und Buschwerk noch nachbleiben. In einer zweiten Iteration lassen sich auch diese identifizieren (Abb. 14). Die globale zweistufige Filterung führte in Waldgebieten zu zufrieden stellenden Ergebnissen.

#### 4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Ohne Berücksichtigung unterschiedlicher Strukturen führt die automatische Filterung eines DOM zu einem DHM nicht immer zu optimalen Ergebnissen. Eine individuelle Filterung der einzelnen Geländeklassen zeigt deutliche Verbesserungen. Besondere Vorteile ergeben sich bei Siedlungen mit großen Gebäuden, Forst, Wasserläufen, Durchfahrtstrassen und Dämmen. Die Einführung von Bruchkanten vermeidet bei Dämmen und Durchfahrtstrassen die Abrundung von Böschungsschultern. Wesentliche Unterschiede einer globalen gegenüber einer segmentierten Filterung ergeben sich in Siedlungs- und Waldgebieten. Insgesamt vereinfacht die Segmentierung die Reduzierung eines DOM in ein DHM, wobei einzelne Klassen wegen ähnlichen Verhaltens zusammengefasst werden können.

#### Literatur

- BAATZ, M. & MIMLER, M., 2002: Bildobjekt-Primitive als Bausteine – Extraktion von Objekten „of interest“ bzw. anthropogenen Objekten basierend auf der expliziten Kanteninformation von Bildobjekt-Primitiven. – In: BLASCHKE, T. (Hrsg.): GIS und Fernerkundung: Neue Sensoren – Innovative Methoden. – pp. 179–188, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- JACOBSEN, K. & PASSINI, R., 2001: Filtering of Digital Elevation Models. – GIS 2001, Vancouver.
- JACOBSEN, K., 2001: New Developments in Digital Elevation Modelling. – Geoinformatics, Juni 2001: 18–21.
- KRAUS, K., 1997: Eine neue Methode zur Interpolation und Filterung von Daten mit schiefer Fehlerverteilung. – Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation 1/1997: 25–30.
- LOHMANN, P. & KOCH, A., 2000: Schaeffer M., Approaches to the Filtering of Laser Scanner Data. – IAPRS (33), B3/1: 534–541, Amsterdam.
- LOHMANN, P., 2002: Segmentation and Filtering of Laser Scanner Digital Surface Models. – IntArchPhRS, Com.II, Xi'an, Vol.XXXIV, Part 2: 311–315.
- PASSINI, R., BETZNER, D. & JACOBSEN, K., 2002: Filtering of Digital Elevation Models. – ASPRS Annual Convention, Washington 2002.
- SCHULTZE, D., 2003: Segmentierte Filterung von Laserscanner-Daten. – Diplomarbeit, Universität Hannover.
- VOELZ, H., 2001: Mathematische Grauwertmorphologie zur Filterung Digitaler Oberflächenmodelle. – Diplomarbeit, Universität Hannover, [www.ipi.uni-hannover.de/html/lehre/diplomarbeiten/2001/2001.htm](http://www.ipi.uni-hannover.de/html/lehre/diplomarbeiten/2001/2001.htm)

#### Anschriften der Autoren:

Dr.-Ing. KARSTEN JACOBSEN  
Tel.: 0511-762-2485, Fax: 0511-762-2483  
e-mail: [jacobsen@ipi.uni-hannover.de](mailto:jacobsen@ipi.uni-hannover.de)

Dr.-Ing. PETER LOHMANN  
Tel.: 0511-762-2486, Fax: 0511-762-2483  
e-mail: [lohmann@ipi.uni-hannover.de](mailto:lohmann@ipi.uni-hannover.de)  
Universität Hannover  
Institut für Photogrammetrie und  
GeoInformation  
Nienburger Str., D-30167 Hannover

Manuskript eingereicht: Dezember 2003  
Angenommen: Januar 2004



## Qualitätsverbesserung von Laseraltimetrie Höhenmodellen

REGINE BRÜGELMANN, GERT BRAND & SANDER OUDE-ELBERINK, Delft, Niederlande

**Keywords:** laser altimetry, DEM/DTM, quality, height precision, strip adjustment

**Zusammenfassung:** In den Niederlanden benötigen die regionalen Wasserbehörden die mittlere Geländehöhe von 100 bis 700 ha großen Gebieten mit Zentimetergenauigkeit, um die erlaubten Wasserpegel in diesen Gebieten genau festlegen zu können. Das neue niederländische digitale Höhenmodell, das mit Laseraltimetrie erfasst wurde, erreicht diese Genauigkeit nicht. In einer früheren Netzwerkanalyse wurde jedoch gezeigt, dass diese Genauigkeit mit zusätzlichen Passpunkten in einer 1D-Streifenausgleichung doch erreicht werden kann. Um diese theoretischen Ergebnisse zu verifizieren, wurde ein praktischer Test durchgeführt. In diesem Artikel werden der Aufbau dieses Tests, die erzielten Ergebnisse und eine Kosten-Nutzen Betrachtung für verschiedene Befliegungsszenarios präsentiert.

**Summary:** *Improvement of the height precision of laser altimetry elevation models.* In the Netherlands, local water boards need the mean field heights of water management entities of about 100 ha up to 700 ha with cm-precision. This guarantees the precise determination of the permitted water levels, which are related to the mean field heights. The new Dutch digital elevation model, which has been acquired with laser altimetry, does not meet these high precision demands. However, formerly performed block design analysis showed that adding more ground control points and extra cross strips in a 1D strip adjustment can improve the height precision of a laser altimetry elevation model. In order to verify these theoretical results, a practical test was performed. This article is about the configuration and the results of this test. Furthermore, costs and benefits of different flight configurations are treated.

### 1 Einleitung

Ein großer Teil der Niederlande liegt unterhalb des Meeresspiegels. Viele Gebiete müssen daher mit einem komplexen Kanal- und Pumpsystem (siehe Abb. 1) künstlich entwässert werden, da sie sonst zu feucht sind für eine agrarische Nutzung. Auf der anderen Seite darf der Wasserpegel in vor allem Torfgebieten auch nicht zu niedrig sein, da das Einsinken des Bodens dort sonst noch schneller fortschreiten würde, was nicht erwünscht ist.

Zu den Aufgaben der regionalen Wasserbehörden gehört das Festlegen der Höhe des Wasserpegels per Gebiet. Dies geschieht auf den Zentimeter genau. Die Größe der Gebiete variiert von etwa 100 bis 700 ha.

Der Wasserpegel wird definiert in Bezug auf die mittlere Geländehöhe. Bislang wird diese Höhe mit einem Punkt pro Hektar terrestrisch gemessen (Tachymetrie, DGPS),



**Abb. 1:** Luftbild eines typischen niederländischen Torfgebiets mit Weiden und zahlreichen Entwässerungskanälen.

was jedoch teuer und zeitraubend ist. Deshalb wurde das neue, digitale Höhenmodell der Niederlanden, das AHN („Actueel Hoogtebestand Nederland“), sehr begrüßt und für die Berechnung von mittleren Geländehöhen eingesetzt. Das AHN besitzt eine mittlere Punktdichte von 1 Punkt per 16 m<sup>2</sup> und eine Höhengenaugkeit von ungefähr 15 cm (1  $\sigma$ ) pro Punkt. Analysen haben jedoch gezeigt, dass die Genauigkeit der hieraus berechneten mittleren Geländehöhen den strengen Anforderungen in Torfgebieten nicht genügt. Dort sind die Genauigkeitsanforderungen höher, weil schon kleine Variationen des Wasserpegels Einfluss haben auf das Einsinkverhalten des Bodens.

Daher wurde beim Vermessungsamt über Möglichkeiten nachgedacht, um die Höhengenaugkeit des AHN zu verbessern. In einer Netzwerkanalyse wurde der Effekt von zusätzlichen Passpunkten und Querflugstreifen in einer 1D-Streifenausgleichung auf die Genauigkeit theoretisch untersucht. Ausgangspunkt war ein Laserblock mit 50 Flugstreifen von jeweils 30 km Länge und 400 m Breite und 100 m breiten Überlappungsbereichen zwischen den Streifen. In der Ausgleichung wurden drei Parameter pro Streifen geschätzt: eine Translation (Höhenoffset) und zwei Rotationen (Längs- und Querneigung), siehe CROMBAGHS et al. 2000). Die

Netzwerkanalyse zeigte, dass mit mehr Passpunkten deutlich eine bessere Genauigkeit der Höhenoffsets, und damit der mittleren Geländehöhe, erzielt werden kann. Die zusätzlichen Querflugstreifen bewirken vor allem eine Homogenisierung der Genauigkeit der Höhenoffsets über den ganzen Block.

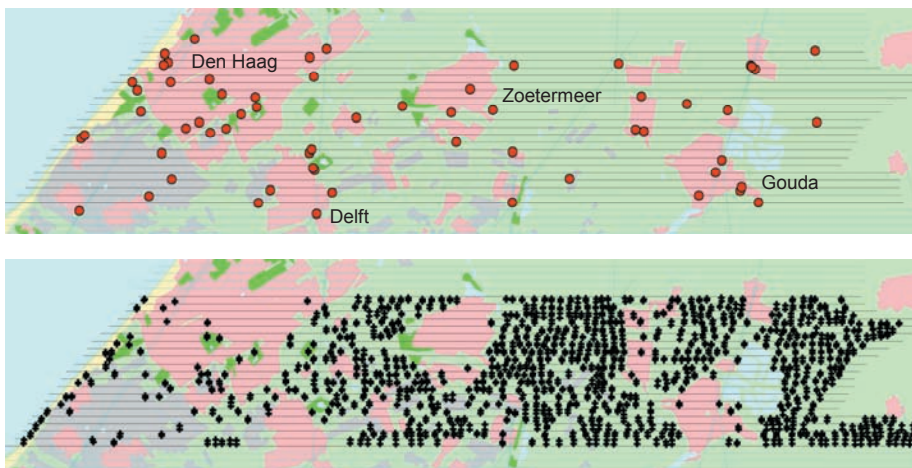
Das Verhältnis zwischen der Streifen- und Passpunktanzahl ist beim regulären AHN ungefähr 2,6. Ein Verhältnis von 1,3 ist erforderlich, um den hohen Genauigkeitsanforderungen in Torfgebieten gerecht zu werden. Mit dieser sogenannten AHN+ Konfiguration müssten die folgenden Genauigkeiten für die mittleren Geländehöhen von 100 und 700 ha großen Gebieten erzielbar sein:

$$\sigma_{100 \text{ ha}} = 1,7 \text{ cm} \quad \text{und} \quad \sigma_{700 \text{ ha}} = 1,0 \text{ cm} .$$

Hierbei sind Saisons-, Tages- und lokale Variationen (siehe Abschnitt 5) bereits mitgerechnet. Der Einfluss von Vegetation auf die Höhenbestimmung der Geländeoberfläche wurde jedoch nicht berücksichtigt.

## 2 Testgebiet und Testdaten

Um zu überprüfen, ob diese theoretischen Ergebnisse auch in der Realität erzielt werden können, wurde ein praktischer Test durchgeführt. Für diesen Test wurde einer



**Abb. 2:** Testgebiet mit Blockkonfiguration (Flugstreifen) sowie mit Lage der 69 Passpunkte (oben) und 1612 Verbindungspunkte (unten). Legende: rosa = Stadt, grau = Gewächshäuser, gelb = Dünen, dunkelgrün = Wald, hellgrün = agrarische Gebiete, blau = Wasser.

der zuletzt für das AHN geflogenen Blöcke gewählt. Das Testgebiet umfasst ungefähr  $10 \text{ km} \times 50 \text{ km}$  im Westen der Niederlande und erstreckt sich von der Küste bei Den Haag bis Gouda (siehe Abb. 2).

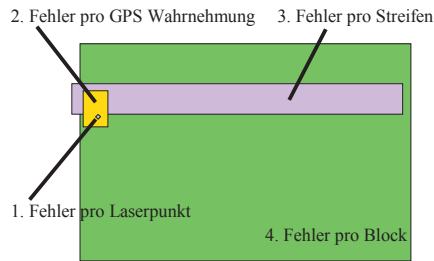
Die Blockkonfiguration entspricht einer regulären AHN Konfiguration, jedoch wurden vier anstelle von nur einem Querstreifen geflogen. Die 21 Flugstreifen mit einer Länge von etwa  $50 \text{ km}$  verlaufen in west-östlicher Richtung. Die Querstreifen verlaufen in nord-südlicher Richtung. Die Streifen sind  $500 \text{ m}$  breit, der Überlappungsbereich  $80 \text{ m}$ .

Um die Resultate der Netzwerkanalyse in der Realität kontrollieren zu können, wurde eine große Anzahl Passpunkte terrestrisch gemessen. Während für einen AHN Block von dieser Größe im Normalfall 8 Passpunkte gemessen werden, standen für den Test insgesamt 69 Passpunkte zur Verfügung. Jeder Streifen enthält mindestens 2 Passpunkte. Ein Passpunkt ist ein etwa  $1 \text{ ha}$  großes, horizontales und ebenes Gebiet ohne Vegetation, in dem ca. 100 Punkte terrestrisch gemessen werden. Meistens dienen Fußballfelder als Passpunkte.

### 3 Streifenausgleichung

Der Gesamtfehler bei mit Laseraltimetrie erfassten Höhenmodellen setzt sich aus verschiedenen Fehlerkomponenten zusammen, die unterschiedlich große Amplituden und räumliche Auflösungen besitzen (CROMBAGHS et al. 2002). Im Folgenden werden die verschiedenen Fehlerkomponenten erläutert (siehe auch Abb. 3):

1. *Punktfehler*: Das Rauschen in den einzelnen Laserpunkten durch die Abstandsmessung mit dem Laserscanner.
2. *Fehler pro GPS-Wahrnehmung (Streifenabschnitt)*: Kurzwellige Streifenverformungen aufgrund fehlerhafter Positionsbestimmung des Flugzeugs.
3. *Fehler in den Flugstreifen*: Langwellige Streifenverformungen aufgrund von Fehlern in den GPS/INS Wahrnehmungen.
4. *Fehler des gesamten Blocks*: Fehler im Anschluss an das Landeshöhensystem (NAP) durch Fehler in den Passpunkten.



**Abb. 3:** Fehlerkomponenten bei Laseraltimetrie Höhenmodellen und ihre räumliche Auflösung.

In der ausgeführten 1D-Streifenausgleichung werden einander überlappende Streifen durch sogenannte Verbindungspunkte aneinander gekoppelt. Dies sind manuell selektierte  $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$  große, ebene Gebiete ohne (oder mit niedriger) Vegetation, die ungefähr 150 Laserpunkte enthalten. Gleichzeitig werden die Streifen mit Passpunkten angeschlossen an das Landeshöhensystem (NAP). Wahrnehmungen sind die Höhenunterschiede in den Verbindungs- und Passpunkten. Die in die Ausgleichung eingehende Qualität der Wahrnehmungen ist eine Funktion der ersten drei Fehlerkomponenten (siehe CROMBAGHS et al. 2002). Die zu schätzenden Parameter sind die Höhenoffsets der Streifen. Es wurde bewusst darauf verzichtet, auch die Längs- und Querneigung der Streifen zu schätzen, um mögliche Blockdeformationen durch parabolische Streifenverformungen quer zur Flugrichtung zu vermeiden.

Die Genauigkeit der Höhenoffsets der Streifen, die vierte Fehlerkomponente (Qualität des Anschlusses an NAP), wird beschrieben in der Kovarianzmatrix der Unbekannten und ist damit ein Resultat der Ausgleichung. Die Kovarianzmatrix ist eine Funktion der Genauigkeit der Wahrnehmungen und der Blockkonfiguration. Die Blockkonfiguration besteht aus der Anzahl und Lage der Längs- und Querstreifen sowie der Verbindungs- und Passpunkte.

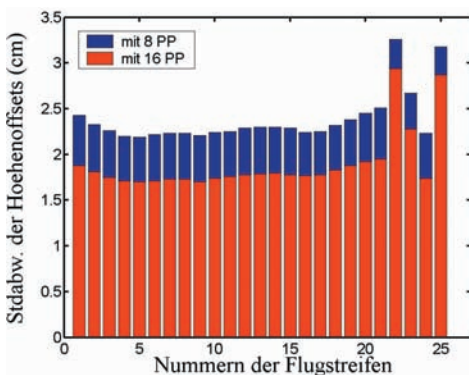
### 4 Ergebnisse

In dem durchgeführten Test sollte untersucht werden, inwieweit die Höhengenaug-

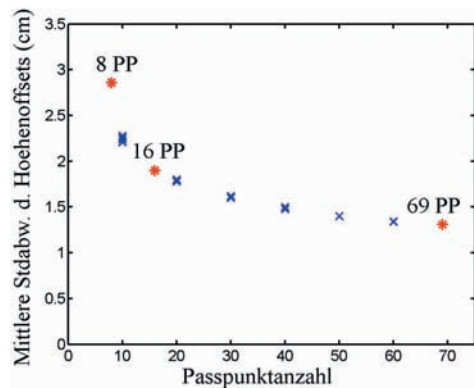
keit der Streifen beim Hinzufügen von extra Passpunkten in der Streifenausgleichung verbessert wird. In Abb. 4 sind die Standardabweichungen der Höhenoffsets pro Streifen für eine normale AHN Konfiguration (8 Passpunkte) und die sogenannte AHN + Konfiguration (16 Passpunkte) angegeben. Verdopplung der Passpunkte bewirkt eine Genauigkeitsverbesserung von ungefähr 0,5 cm für den Höhenoffset jedes Streifens. Mit 16 Passpunkten in 21 Streifen konnte eine Genauigkeit von gemittelt 1,8 cm erreicht werden.

Deutlich ist auch, dass die Reduzierung von Verbindungspunkten einen negativen Effekt hat auf die Höhengenaugkeit der Streifen. Die Streifennummern 21 bis 25 bezeichnen die Querstreifen. In drei davon wurden deutlich geringere Genauigkeiten erzielt, weil dort viel weniger (< 25) ebene Verbindungspunkte gefunden werden konnten als in den anderen Streifen mit 80 bis 180 Verbindungspunkten. Dies liegt daran, dass diese Streifen über Stadtgebieten, ausgedehnten Gewächshausgebieten und Wasserflächen liegen.

In einer weiteren Analyse wurde der Einfluss der Anzahl Passpunkte auf die *mittlere* Standardabweichung aller Höhenoffsets des gesamten Blocks untersucht. Abb. 5 visualisiert die Ergebnisse. Darin geben mehrere Kreuze für dieselbe Anzahl von Passpunkten an, dass verschiedene Passpunktteilmen gen verwendet wurden. Mit zunehmender



**Abb. 4:** Standardabweichung der Höhenoffsets pro Streifen nach der Ausgleichung mit 8 (blau) und 16 (rot) Passpunkten (PP).



**Abb. 5:** Mittlere Standardabweichung aller Streifen (außer den Querstreifen) für verschiedene Passpunkt Anzahlen (PP = Passpunkt).

Passpunktanzahl verbessert die NAP-Anschlussgenauigkeit des Blocks. Dieser Effekt wird jedoch geringer mit zunehmender Passpunktanzahl. Von einem bestimmten Grenzwert an, z. B. 30 Passpunkten, verbessert die Blockgenauigkeit kaum noch.

## 5 Ableitung der Genauigkeit der mittleren Geländehöhe

Um von der Höhengenaugkeit der Streifen zur Genauigkeit der mittleren Geländehöhen zu kommen, muss noch ein weiterer Schritt gesetzt werden. Für die Berechnung der mittleren Geländehöhe werden alle Laserpunkte innerhalb des betroffenen Gebietes gemittelt, wobei Punkte auf Gebäuden, auf Vegetation und in Wassergräben zuvor eliminiert werden. Die Genauigkeit der mittleren Geländehöhe kann bestimmt werden durch Fehlerfortpflanzung von verschiedenen Fehlerkomponenten. Neben den vier Laseraltimetrie Fehlerkomponenten (siehe Paragraph 3) müssen dabei noch andere Fehlerkomponenten berücksichtigt werden:

- Jahreszeitliche Variation:* Hier geht es um An- und Abswellen des Bodens durch jahreszeitlich bedingte Veränderungen des Grundwasserspiegels und der Bodenfeuchtigkeit.
- Tagesvariation:* Dieser Fehler wird verursacht durch unterschiedliche Refraktion in der Atmosphäre wegen täglicher



Temperaturschwankungen. Dieses Problem ist bekannt bei tachymetrischen Messungen und spielt möglicherweise auch eine Rolle bei Laseraltimetrie.

- C. *Lokale Variation*: Diese Fehlerkomponente bezeichnet den Unterschied zwischen der Höhe einer Rasterzelle des DHMs und der mittleren Höhe des tatsächlichen Geländes innerhalb dieser Rasterzelle. Die lokale Variation beschreibt, wie gut ein Messpunkt das Gelände repräsentiert.

Jahreszeitliche und lokale Variationen haben nichts mit der Technik Laseraltimetrie zu tun. Sie dürfen jedoch nicht vernachlässigt werden bei der Berechnung mittlerer Geländehöhen für wasserwirtschaftliche Zwecke.

Die Höhengenaugigkeit eines einzelnen Laserpunkts wird berechnet, indem alle Fehlerkomponenten quadratisch addiert werden:

$$\sigma_{\text{pkt}} = \sqrt{\sigma_j^2 + \sigma_t^2 + \sigma_{\text{lo}}^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2}$$

Mit:

- $\sigma_s$  = Jahreszeitliche Variation
- $\sigma_t$  = Tagesvariation
- $\sigma_{\text{lo}}$  = Lokale Variation
- $\sigma_1$  = Punktrauschen (Laserscanner)
- $\sigma_2$  = Kurzwellige Streifenfehler (GPS)
- $\sigma_3$  = Langwellige Streifenfehler (GPS/INS)
- $\sigma_4$  = Anschluss an NAP  
( $\sigma$  der Höhenoffsets)

In einem einzelnen Laserpunkt sind also alle Fehler in vollem Umfang vorhanden. Die Standardabweichung der mittleren Geländehöhe eines Gebiets wird in ähnlicher Weise berechnet, jedoch wird die Amplitude einiger Fehlerarten durch Mittelung reduziert:

$$\sigma_{\text{geb}} = \sqrt{\sigma_j^2 + \sigma_t^2 + \frac{\sigma_{\text{lo}}^2}{n1} + \frac{\sigma_1^2}{n1} + \frac{\sigma_2^2}{n2} + \frac{\sigma_3^2}{n3} + (\alpha \sigma_4)^2}$$

Mit:

- $n1$  = # Laserpunkte
- $n2$  = # Streifenstücke (~ 100 m lang)
- $n3$  = # Streifen
- $\alpha$  = Faktor zwischen 0 und 1

Für die Genauigkeit eines größeren Gebiets, das durch mehrere Flugstreifen bedeckt wird, gilt, dass die Standardabweichung des Höhenoffsets eines einzelnen Streifens ( $\sigma_4$ ) reduziert wird mit einem Faktor  $\alpha$ , der zwischen 0 und 1 liegt. Dieser Faktor ist abhängig von der Streifenanzahl und der Korrelation zwischen den Streifen. Für einen einzelnen Streifen gilt:  $\alpha = 1$ . Bei einem großen Gebiet mit vielen Streifen scheint  $\alpha$  sich einem bestimmten Minimum zu nähern (siehe Abb. 6). Der exakte Wert von  $\alpha$  kann abgeleitet werden von der Kovarianzmatrix der Unbekannten. Für praktische Zwecke ist es jedoch einfacher, eine Faustregel zu benutzen. Mehr hierüber ist zu finden in OUDE ELBERINK et al. (2003).

## 6 Ergebnisse für die Genauigkeit der mittleren Geländehöhe

In dem Testgebiet wurde für 100 und 700 ha große Gebiete die Standardabweichung der mittleren Geländehöhe berechnet. Die Standardabweichungen der vier Laseraltimetrie Fehlerkomponenten wurden aus den Laserdaten des Testgebiets berechnet. CROMBAGHS et al. (2002) geht näher auf die Methoden zur Berechnung dieser Fehler ein. Die Standardabweichungen der jahreszeitlichen und Tagesvariation wurden aus der Literatur übernommen (SCHOTHORST 1977 und Grondmechanica Delft 1995). Die Standardabweichung der lokalen Variation wur-

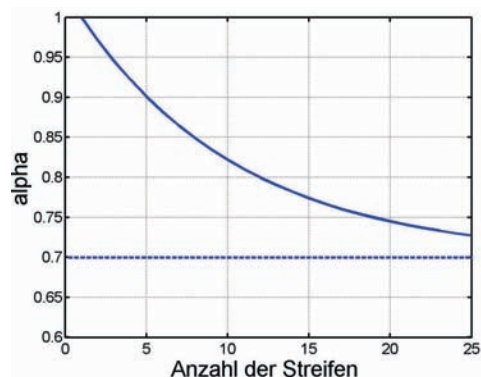


Abb. 6: Reduktionsfaktor  $\alpha$  für  $\sigma_4$  in Abhängigkeit von der Streifenanzahl für den Fall:  $2 < (\#PP / \# \text{Querstreifen}) < 5$ .

**Tab. 1:** Varianzen der verschiedenen Fehlerkomponenten (PP = Passpunkte).

Varianz	Fehlerquelle	Amplitude	
$\sigma_1^2$	Jahreszeitliche Variation	$0.25^2 \text{ cm}^2$	
$\sigma_2^2$	Tagesvariation	$0.35^2 \text{ cm}^2$	
$\sigma_{10}^2$	Lokale Variation	$5^2 \text{ cm}^2$	
$\sigma_1^2$	Punktrauschen des Laserscanners	$7^2 \text{ cm}^2$	
$\sigma_2^2$	Kurzweilige Streifenverformungen	$4.5^2 \text{ cm}^2$	
$\sigma_3^2$	Langweilige Streifenverformungen	$3.6^2 \text{ cm}^2$	
$\sigma_4^2$	Mittlere Varianz der Streifen-Höhenoffsets	# PP = 69	$1.3^2 \text{ cm}^2$
		# PP = 16	$2.0^2 \text{ cm}^2$
		# PP = 8	$2.6^2 \text{ cm}^2$

de für die Punktdichte von 1 Punkt pro  $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$  geschätzt auf 5 cm. Tab. 1 gibt eine Übersicht über die Amplituden aller Fehlerkomponenten.

Die Berechnung der Genauigkeit der mittleren Geländehöhe wird an einem Beispiel aus dem Testgebiet erläutert. Ein beliebiges 700 ha großes Gebiet enthält 437 000 Laserpunkte, 182 Streifenstücke und 7 Streifen. Mit 16 Passpunkten gilt für den Reduktionsfaktor  $\alpha = 0,895$ . Werden diese Werte eingesetzt in die zweite Gleichung von Paragraph 5, so erhält man:

$$\begin{aligned} \sigma_{700 \text{ ha}} &= \left( 0.25^2 + 0.35^2 + \frac{5^2}{437\,500} + \frac{7^2}{437\,500} \right. \\ &\quad \left. + \frac{20}{182} + \frac{13}{7} + (0.895 \cdot 2.01)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \\ &= 2.3 \text{ cm} . \end{aligned}$$

Die Ergebnisse für verschiedene Passpunktanzahlen wurden den theoretischen Resultaten aus der Netzwerkanalyse gegenübergestellt. Tab. 2 zeigt, dass die vorhergesagten Ergebnisse nicht erreicht werden konnten. Selbst mit allen verfügbaren Passpunkten – für eine operationelle Erfassung eine unrealistisch große Anzahl – konnten die erwar-

**Tab. 2:** Genauigkeit der mittleren Geländehöhe für verschieden große Gebiete.

	Netzwerk-analyse	praktischer Test		
		# Passpunkte	8	16
$\sigma_{100 \text{ ha}}$ [cm]	1.7	3.4	3.0	2.6
$\sigma_{700 \text{ ha}}$ [cm]	1.0	2.8	2.3	1.8

teten Genauigkeiten, die von den regionalen Wasserbehörden erwünscht sind, nicht erzielt werden.

Der Hauptgrund für diese etwas enttäuschenden Ergebnisse sind vor allem die langweiligen Streifenverformungen. Sie wurden in der Netzwerkanalyse nicht berücksichtigt, weil ihre Existenz zum Zeitpunkt der theoretischen Analysen noch nicht bekannt war.

Mit der verfügbaren Software für die 1D-Streifenausgleichung ist es noch nicht möglich, diese Fehler zu reduzieren oder zu beseitigen. Mit einer vollständigen 3D-Streifenausgleichung, so wie sie z. B. durch BURMAN (2002) und VOSSELMAN & MAAS (2001) vorgestellt wird, kann die Höhengenaugigkeit von Laseraltimetrie Höhenmodellen aufgrund der realistischeren Modellierung der auftretenden Fehler wahrscheinlich noch weiter verbessert werden.

## 7 Kosten-Nutzen Betrachtung

Die Resultate des ausgeführten Tests zusammen mit dem neuen Fehlerbeschreibungsmodell für Laseraltimetrie (siehe Paragraph 3) ermöglichen es, die Kosten und Nutzen von verschiedenen Flugszenarios relativ einfach zu ermitteln. Auf Fragen wie „Was sind die Kosten für die Qualitätsverbesserung der Laserdaten?“ oder „Welche verschiedenen Flugszenarios gibt es, und was ist jeweils ihr Einfluss auf Kosten, Punktdichte, Genauigkeit und Zuverlässigkeit?“ können nun Antworten gefunden werden. Drei verschiedene Möglichkeiten zur Qualitätsverbesserung werden diskutiert:

- eine höhere Punktdichte,
- mehr Passpunkte und
- ein Gebiet zweimal fliegen.

Zuerst richten wir uns auf eine höhere Punktdichte. Deren größter Vorteil ist eine detailliertere Terrainbeschreibung und eine Verbesserung der Höhengenaugigkeit in kleineren Gebieten aufgrund des Wegmittels des Laserscanner Punktrauschens. Auf der anderen Seite sind für die Erzielung einer höheren Punktdichte durch die niedrigere Flughöhe meist mehr Flugstreifen nötig. Dies erhöht die Kosten beträchtlich. Jedoch ist damit auch eine Genauigkeitsverbesserung für die mittlere Höhe von größeren Gebieten möglich durch das Wegmitteln von Streifenfehlern, die durch GPS/INS-Fehler verursacht werden.

Im Folgenden werden die Vor- und Nachteile von vier verschiedenen Flugszenarios für die Erfassung eines 700 km<sup>2</sup> großen Gebietes diskutiert. Tab. 3 fasst die Kosten und Nutzen für die folgenden Szenarios zusammen:

- Fall 1: Erfassung des Gebiets mit einmaligem Flug und niedriger Punktdichte.
- Fall 2: Erfassung des Gebiets mit einmaligem Flug und hoher Punktdichte.
- Fall 3: Erfassung des Gebiets mit einmaligem Flug und hoher Punktdichte sowie einer großen Anzahl von Passpunkten.
- Fall 4: Erfassung des Gebiets mit zweimaligem Flug und niedriger Punktdichte.

Fall 1 entspricht einer normalen AHN Konfiguration. Die anderen drei Fälle verdeutlichen Möglichkeiten zur Qualitätsverbesserung.

Die Anzahl der €-Symbole stellt eine Kostenindikation für jedes Szenario dar.

Im Gegensatz zu einem Punkt pro 16 m<sup>2</sup> in Fall 1 ist die Punktdichte im Fall 2 ein Punkt pro 4 m<sup>2</sup>. Die Kosten für den Flug steigen hierbei beträchtlich (um 50%), da viel mehr Kilometer geflogen werden müssen wegen der geringeren Flughöhe und dadurch schmälere Streifen. Der Genauigkeitsgewinn ist jedoch sehr klein für kleine Gebiete (5 m × 5 m). Bei größeren Gebieten (100 ha) verschlechtert sich die Höhengenaugigkeit sogar um beinahe 50%. Dies wird vor allem verursacht durch das schlechtere Verhältnis zwischen der Anzahl Streifen und der Anzahl Passpunkte. Erst wenn so wie im Fall 3 auch die Anzahl der Passpunkte angepasst wird an die große Anzahl Flugstreifen, wird die Genauigkeit für größere Gebiete (100 ha) etwas besser als im Fall 1. Die Genauigkeit bei kleineren Gebieten verbessert sich sogar deutlich (ungefähr 30%). Die Messung der Passpunkte ist jedoch sehr teuer: die Preissteigerung in Bezug auf Fall 1 ist 100%.

Eine – vielleicht ungewöhnliche – Alternative ist, das Gebiet in zwei unabhängigen Flügen zu erfassen (Fall 4). Unter der Annahme, dass die meisten Fehler bei zwei unabhängigen Flügen unkorreliert sind und dass für den zweiten Flug andere (neue) Passpunkte gemessen werden, wird in diesem Fall der totale Fehler um Faktor  $\sqrt{2}$  reduziert. Die Genauigkeitsverbesserung und die Kosten gleichen ungefähr dem drit-

**Tab. 3:** Verbesserung der Höhengenaugigkeit in Relation zu den Kosten für ein 700 km<sup>2</sup> großes Gebiet (PP = Passpunkt).

	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4
# Flüge	1	1	1	2
Punktdichte	1 Pkt. pro 4m × 4m	1 Pkt. pro 2m × 2m	1 Pkt. pro 2m × 2m	2 Pkt. pro 4m × 4m
# PP	14	14	49	2 × 14 = 28
# Streifen	42	148	148	2 × 42 = 84
Kosten	€€	€€€	€€€€	2 × €€ = €€€€
Zuverlässigkeit	–	–	–	+
$\sigma_{5m \times 5m}$	14 cm	12 cm	9 cm	$14/\sqrt{2} = 10$ cm
$\sigma_{100ha}$	6.2 cm	9.2 cm	5.4 cm	$6.2/\sqrt{2} = 4$ cm

ten Szenario (Fall 3), die Genauigkeit ist für größere Gebiete sogar etwas besser. Der besondere Vorteil vom vierten Szenario ist jedoch die größere Zuverlässigkeit der Messergebnisse durch eine zweite, unabhängige Erfassung. Auf der anderen Seite ist die Punktdichte bei Fall 4 etwas geringer als bei Fall 3. Die Geländebeschreibung ist damit weniger detailliert.

Das obige Beispiel verdeutlicht, dass eine Kosten-Nutzen Analyse für verschiedene Laseraltimetrie Flugszenarios durch sehr viele verschiedene Parameter beeinflusst wird. Eine sorgfältige Abwägung aller Aspekte ist erforderlich. Dabei sollte auch den Wünschen des Endnutzers der Höhendaten Gehör gegeben werden, um ihm ein optimales und maßgeschneidertes Produkt liefern zu können.

## 8 Schlussfolgerungen

Die Höhengenaugkeit von Laseraltimetrie Höhenmodellen kann verbessert werden, indem mehr Passpunkte in der 1D-Streifenausgleichung benutzt werden. Der Genauigkeitsgewinn fällt jedoch geringer aus, als zuvor ausgeführte Netzwerkanalysen vermuten ließen. Der Hauptgrund dafür sind Streifenverformungen durch Fehler in GPS und INS, die nicht in der Netzwerkanalyse berücksichtigt wurden. Sehr wahrscheinlich kann die Höhengenaugkeit noch weiter verbessert werden durch eine 3D-Streifenausgleichung, in der auch die Streifenverformungen modelliert werden.

Die Ergebnisse des Tests sind allgemeingültiger, auch wenn der Test nur für einen einzigen Laseraltimetrie Block durchgeführt wurde, weil eine große Anzahl Analysen von Laserdaten anderer Scanner und Firmen gezeigt haben, dass die Fehleramplituden der verschiedenen Fehlerkomponenten vergleichbar sind mit den hier gefundenen (siehe auch CROMBAGHS et al. 2002).

Der Nutzen der Testresultate – zusammen mit dem neuem Fehlerbeschreibungmodell – besteht vor allem daraus, dass für zukünftige Projekte eine weitgehende Kosten-Nutzen Betrachtung für verschiedene Flugszenarios ermöglicht wird.

## Literatur

- BURMAN, H., 2002: Laser strip adjustment for data calibration and verification. – Proceedings of the ISPRS Symposium "Photogrammetric Computer Vision", Graz, Austria. ISPRS Archives, Volume 34, Part 3A: 67–72.
- CROMBAGHS, M.J.E., BRÜGELMANN, R. & DE MIN, E.J., 2000: On the adjustment of overlapping strips of laseraltimeter height data. – Proceedings of the ISPRS Symposium, Amsterdam, The Netherlands. ISPRS archives, Volume 33, Part B3/1: 224–231.
- CROMBAGHS, M.J.E., OUDE ELBERINK, S.J., BRÜGELMANN, R. & DE MIN, E.J., 2002: Assessing height precision of laser altimetry DEM's. – Proceedings of the ISPRS Symposium "Photogrammetric Computer Vision", Graz, Austria. ISPRS Archives, Volume 34, Part 3A: 85–90.
- Grondmechanica Delft, 1995: Meting maaiveldhoogte en -daling. – Bericht SE-56004/20, Delft, Niederlande. [Niederl.]
- OUDE ELBERINK, S., BRAND G. & BRÜGELMANN, R., 2003: Quality improvement of laser altimetry DEM's. – Proceedings of the ISPRS workshop "3-D reconstruction from airborne laser-scanner and InSAR data", Dresden, Germany. ISPRS archives, Volume 34, Part 3/W13: 51–58.
- SCHOTHORST, C.J., 1977: Subsidence of low peat moor soils in the Western Netherlands. – *Geoderma* 17: 265–291.
- VOSSELMAN, G. & MAAS, H.-G., 2001: Adjustment and filtering of raw laser altimetry data. – Proceedings of the OEEPE workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models, Stockholm, Sweden. OEEPE Publication no. 40: 62–72.

Anschrift der Autoren:

Dr.-Ing. REGINE BRÜGELMANN  
e-mail: r.brugelmann@agi.rws.minvenw.nl  
Tel: +31-15-275-7137

M.Sc. GERT BRAND  
e-mail: g.b.m.brand@agi.rws.minvenw.nl  
Tel: +31-15-275-7112

Ir. SANDER OUDE ELBERINK  
e-mail: s.j.oude-elberink@agi.rws.minvenw.nl  
Tel: +31-15-275-7115

Ministerium für Verkehr und Wasser Management, Vermessungsamt  
Postfach 5023, NL-2600 GA Delft

Manuskript eingereicht: Dezember 2003  
Angenommen: Januar 2004

## Extraktion von Eigenschaften der Straßengeometrie aus Laserscannerdaten und vorhandener Geoinformation

CARSTEN HATGER & CLAUS BRENNER, Hannover

**Keywords:** laser scanning, road parameter extraction, digital road databases, data fusion

**Zusammenfassung:** Heutige Fahrzeugnavigationssysteme sind hoch entwickelt. Die zu Grunde liegenden digitalen Kartendaten sind flächendeckend verfügbar und hoch aktuell. Fortgeschrittene Anwendungen, z. B. Fahrerassistenz- und Warnsysteme, erfordern jedoch zusätzliche, detailliertere Information über den Straßenverlauf. Attribute wie Höhe, Breite, Längs- und Querneigung sowie die Krümmung des Verkehrsweges müssen zusätzlich erfasst und in die Datenbasis integriert werden. Dieser Artikel zeigt, auf welche Weise diese Eigenschaften mit Hilfe von amtlichen oder privatwirtschaftlich erfassten Geodaten unter Zuhilfenahme luftgestützter Laserscanner-Aufnahmen abgeleitet werden können. Nach einer Einführung in das Problem und der Diskussion des verwendeten Ansatzes erfolgt die Präsentation und Bewertung erster Ergebnisse.

**Summary:** *Extraction of Road Geometry Parameters from Laser Scanning and Existing Databases.* Today's car navigation systems have reached a high level of maturity, using huge map databases with a high coverage and up-to-date-ness. However, as additional applications gain importance, such as advanced driver information and warning systems, more detailed and accurate information on the true road geometry has to be incorporated into those databases. Properties like height, longitudinal and transversal slope, curvature, and width, which are currently not present, have to be acquired and integrated. This article shows how existing databases either from public authorities or from private map providers can be used in combination with aerial laser scan data to derive such properties. Apart from a general discussion of the problem and our approach, first results are presented and discussed.

---

### 1 Einleitung

Viele Problemstellungen des Alltags sind eng mit der Frage nach dem Raumbezug verbunden. Dies gilt insbesondere für die seit 1995 eingeführten Fahrzeugnavigationssysteme. Hier stellt der Raumbezug in Form digitaler Kartendaten eine unerlässliche Grundlage für die Ortung, Routenberechnung und Routenführung dar. Diese Routenführung ist – bedingt durch die zugrunde liegenden Daten – in ihrer Aussage jedoch auf zweidimensionale geometrische und topologische Aspekte beschränkt. Fortgeschrittene Fahrerassistenz- und Warnsysteme benötigen demgegenüber eine deutlich detailliertere und genauere Beschreibung

der Straßengeometrie, beispielsweise in Form von Angaben zur Höhe und Breite sowie zur Längs- und Querneigung des Verkehrsweges.

In Deutschland ist die Höheninformation bundesweit mittels digitaler Geländemodelle (DGM) verfügbar. Sie wird vornehmlich durch die zuständigen Landesbehörden und -betriebe vertrieben. Das vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie vertriebene flächendeckende digitale Geländemodell verfügt über eine Rasterweite von 25 m. Die Lagegenauigkeit ist beschränkt auf 26 m, die Höhengenaugigkeit beträgt 20 m. Nur vereinzelt werden Geländemodelle mit höherer Auflösung und Genauigkeit angeboten. Obwohl Geländemodelle häufig im Planungs-

wesen eingesetzt werden, muss deren räumliche Auflösung für einige Aufgabenstellungen als unzureichend angesehen werden. Wesentlich detailliertere dreidimensionale Beschreibungen der Geländeoberfläche können hingegen mit Hilfe von Laserscanner-Messungen erhalten werden.

Die Anwendungen für hoch auflösende DGM sind vielseitig. Behörden und Betriebe, die mit Entwurf, Planung, Realisierung und Betrieb von Straßen befasst sind, profitieren von einer detaillierten Beschreibung der Geländeoberfläche und mittelbar der Verkehrswege. Chancen bestehen in der präzisen Vorhersage von Schadstoff- und Schallemissionen in Abhängigkeit des Geländeverlaufs. Fahrzeugnavigationssysteme können mithilfe eines DGM optimierte Routen berechnen. Fahrerassistenz- und Warnsysteme nutzen dieses Wissen für die Bereitstellung von Warnungen über das Fahrzeugverhalten im Falle des Durchfahrens enger Kurven und starken Gefälles. Sie berechnen Sichtbarkeiten und passen die Fahrzeugbeleuchtung dem aktuellen Straßenverlauf an. Fahrkomfortfunktionen umfassen die Regelung des Antriebsstrangs und die 3D-Navigation. Schließlich kann die Sicherheit durch aktiven Eingriff in das Fahrgeschehen erhöht werden, beispielsweise indem im Falle einer auf Grund des Straßenverlaufs erkennbaren Gefahrensituation das Fahrzeug rechtzeitig verzögert wird. Derartige Anwendungen werden zurzeit in der Fahrzeugindustrie erforscht.

## 2 Verwandte Arbeiten

Die Extraktion von Straßen aus raumbezogenen Datenquellen wie Luft- oder Satellitenbildern ist bereits seit mehr als zwanzig Jahren Gegenstand wissenschaftlicher Forschung. Viele Ansätze basieren auf Verfahren der Bildanalyse zur Erkennung von Kanten oder der Texturanalyse (DIAL et al. 2001). Andere Methoden nutzen die dynamische Programmierung oder LSB-Snakes um den Prozess der Extraktion weiter zu verbessern (GRUEN et al. 1997a). In neuerer Zeit haben wissenschaftliche Ansätze zunehmend an Bedeutung gewonnen (HINZ et al.

2001). Die vorhandene Information wird dabei sowohl auf globaler (Konnektivität) als auch auf lokaler (Kontext) Ebene analysiert und entsprechend extrahiert (HINZ & BAUMGARTNER 2002, VOSSELMAN 1997). Daneben kann der Interpretationsprozess durch Hinzuziehen existierender raumbezogener Daten gestützt werden (ZHANG et al. 2001). Vergleichsweise gering ist die Anzahl der Arbeiten, die sich mit der Extraktion von Straßen aus Laserscanner-Aufnahmen befassen. PATNAIK et al. (2003) schlagen vor, diese Technik für die Erfassung von Straßendaten zu nutzen. Auf der Basis von Vorinformation werden relevante Bereiche definiert, innerhalb derer mittels Regressionsverfahren Werte für die Längs- und Querneigung der Fahrbahnoberfläche abgeleitet werden. Des Weiteren beschäftigen sich einige Ansätze mit der Aufdeckung von Diskontinuitäten innerhalb der Geländeoberfläche. WILD & KRZYTEK (1996) und VOSSELMAN (2000) führen zu diesem Zweck Bedingungen wie die Krümmung oder Neigung ein. BRÜGELMANN (2000) verwendet ein Verfahren zur Bruchkantenerkennung, um Deiche in Laserscanner-Aufnahmen zu erkennen.

## 3 Datenquellen

### 3.1 ATKIS

Das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS) beschreibt und gliedert die Landschaft nach topographischen Gesichtspunkten in einem objektstrukturierten Modell (AdV 1998). Das Digitale Landschaftsmodell (DLM) bildet die Landschaft zweidimensional im Vektorformat ab. ATKIS-DLM Daten sind bundesweit flächendeckend verfügbar.

Verkehrsbezogene Objekte werden als einfache oder komplexe Objekte modelliert. Anhängige Attribute beschreiben die Breite der Fahrbahn oder des Verkehrsweges, die Anzahl der Fahrspuren sowie die Funktion der Straße. In Abhängigkeit der Objektart sind nicht für alle Objekte auch Attributwerte hinterlegt. Die Lagegenauigkeit ist mit besser als 3 m angegeben. Je nach zugrun-

deliegender Datenquelle können allerdings Fehler in einer Größenordnung bis zu 10 m auftreten.

### 3.2 GDF

GDF (Geographic Data File) ist ein europäischer Standard für digitale Straßendatenbanken (CEN 1995). Der Schwerpunkt dieser Datenbasis liegt auf der Beschreibung der straßengebundenen Verkehrsnetze. Die Spezifikation gestattet die Zuordnung einer Höhenkomponente zu jedem koordinierten Punkt; allerdings wird davon zur Zeit kein Gebrauch gemacht. Der GDF-Standard 3.0 definiert weitere Attribute wie longitudinalen und transversalen Gradient sowie die Durchfahrtshöhe. Die Lagegenauigkeit ist herstellerabhängig und variiert zwischen etwa 15 m in offenem Gelände und 3 m in städtischem Gebiet.

### 3.3 Laser-Scanner-Daten

Für den hier vorgestellten Ansatz wurden Daten verwendet, die mit einem luftgestützten Laserscanner gewonnen wurden. Für eine Beschreibung des Verfahrens vgl. BALTSAVIAS 1999b. Aus den Rohdaten wird ein digitales Oberflächenmodell (DOM) abgeleitet, das sowohl Bodenpunkte als auch hochgelegene Punkte von Gebäuden und

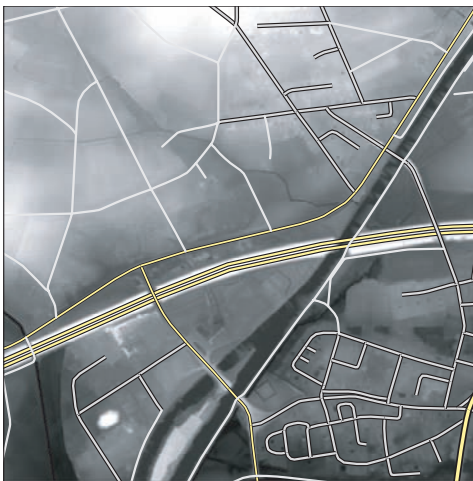


Abb. 1: Testgebiet Castrop-Rauxel

Vegetation beinhaltet. Aus dem DOM wird mit Hilfe geeigneter Verfahren ein hoch auflösendes DGM abgeleitet. Sowohl DOM als auch DGM sind heute verfügbare, kommerziell vertriebene Produkte. Die Punktdichte beträgt etwa vier Punkte pro Quadratmeter. Während die Genauigkeit in der Lage sich auf ca. 0,5 m beläuft (BALTSAVIAS 1999a, LOHR 1999), beträgt sie in der Vertikalen 0,01 bis 0,15 m (BRIESE et al. 2001, WEVER 1999).

Die hier gewählten Testgebiete sind Teile der Städte Stuttgart (Baden-Württemberg), regularisiert mit Rasterweite 1 m und Castrop-Rauxel (Nordrhein-Westfalen), ebenfalls regularisiert, mit Rasterweite 0,5 m. Abb. 1 stellt das Testgebiet Castrop-Rauxel mit überlagerter ATKIS-Information dar. Der Ausschnitt ist so gewählt, dass eine Vielzahl verschiedener Straßentypen enthalten ist. Anliegerstraßen, Feldwege und Landstraßen sind durch graue Liniensignaturen dargestellt, bei den in gelb signaturierten Straßen handelt es sich um Bundesstraßen und Bundesautobahnen.

## 4 Straßen-Querprofile

Der Entwurf und Bau von Straßen ist in der Bundesrepublik Deutschland an ein umfangreiches Werk von standardisierten Verfahren und Richtlinien gebunden. Von besonderem Interesse sind in diesem Zusammenhang solche Regeln, die den Verlauf und den Querschnitt nach bestimmten Kriterien festlegen. Ein Teil dieser Vorgaben ist in FGSV (1996) im Detail erläutert. Für den Entwurf des Straßenverlaufs stehen drei verschiedene Entwurfselemente zu Verfügung: Geraden, Kreisbögen und Klotoiden. Parametrisierte Entwurfselemente sind derart zu kombinieren, dass nur geringe oder keine Unstetigkeiten in den Ableitungen nullter ( $C^0$ -Lage) oder höherer Ordnung ( $C^1$ -Richtung, Gefälle;  $C^2$ -Krümmung) auftreten. Die Beträge dieser Parameter sind beschränkt, um ein hohes Maß an Fahrkomfort und Fahrsicherheit zu gewährleisten. Zusätzliche Entwurfselemente sind mittels standardisierter Straßenquerschnitte, den sogenannten Regelquerschnitten, gegeben.

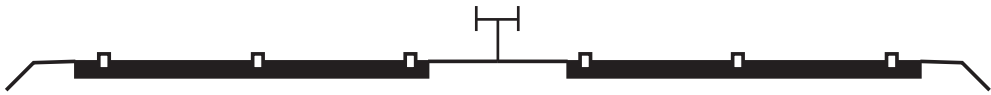


Abb. 2: Regelquerschnitt für baulich getrennte Richtungsfahrbahnen

Die wesentlichen Eigenschaften eines solchen Profils sind neben der Anzahl der Fahrstreifen pro Fahrtrichtung ein ggf. vordringender Trenn- und Standstreifen sowie Bankette. Unter Berücksichtigung der zu erwartenden Verkehrslast sowie der gewählten Straßenfunktion können neun verschiedene Regelquerschnitte im Entwurf verwendet werden. Grafik 2 stellt einen Regelquerschnitt dar, wie er für die Anlage von Kraftfahrstraßen Anwendung findet. Der Querschnitt setzt sich aus insgesamt vier Fahrstreifen, zwei baulich getrennten Richtungsfahrbahnen und zwei Standstreifen sowie Banketten zusammen.

## 5 Segmentierung von Laserscanner-Daten

Verfahren zur Segmentierung von Laserscanneraufnahmen können sich auf Kontinuitäten oder Diskontinuitäten in den Datensätzen stützen. Klassische Ansätze für die Detektion von Diskontinuitäten sind Punktoperatoren, siehe etwa HARALICK & SHAPIRO 1992, CANNY 1986. Die Extraktion linienförmiger Strukturen wird häufig in einem zweiten Schritt vorgenommen. Hierzu werden Konturen durch die Verkettung von Einzelpunkten gebildet. Alternativ kann eine Diskontinuität senkrecht zu einer linienförmigen Struktur auch als kontinuierliches Phänomen beiderseits der Struktur interpretiert werden (BRÜGELMANN 2000, WILD & KRZYSZEK 1996). Kontinuierliche Strukturen können beispielsweise mittels Bereichswachstumsverfahren extrahiert werden. Wird der Umstand berücksichtigt, dass Liniensegmente durch Punkte, Flächen wiederum durch Liniensegmente berandet werden, können stabilere Ergebnisse erhalten werden, wenn null-, ein- und zweidimensionale Primitive gleichzeitig extrahiert werden. Ein solches Verfahren wird auch als

polymorphe Segmentierung bezeichnet (FUCHS 1998).

Es ist immer wünschenswert, so viel Vorwissen als möglich in den Segmentierungsprozess mit einzubeziehen. Solches Wissen kann sowohl aus den in Abschnitt 4 vorgestellten Entwurfsrichtlinien als auch aus den der Datenquelle zu Grunde liegenden Sensoreigenschaften bestehen. In diesem Fall können glatte Straßenoberflächen mit gewisser Mindestdimension lokal näherungsweise als horizontale Ebenen approximiert werden. Zusätzlich kann die Lage der Fahrbahn unter Verwendung von Vorinformation aus Karten – wie sie in den Abschnitten 3.1 und 3.2 bereits eingeführt wurden – als bekannt angenommen werden. Das Messrauschen des Sensors wird hier mit 0,1 bis 0,2 m angesetzt.

Im Folgenden werden zwei verschiedene Ansätze vorgestellt. Bei Erstem handelt es sich um ein allgemeines, planares Segmentierungsverfahren. Der zweite Ansatz ist speziell auf die Segmentierung von Straßen zugeschnitten.

### 5.1 Planare Segmentierung mittels eines allgemeinen Bereichswachstumsverfahrens

Allgemein lässt sich der Ablauf von Bereichswachstumsverfahren in drei Phasen gliedern: (1) Finde die beste Saatregion, die ein gegebenes Prädikat erfüllt. (2) Füge weitere, benachbarte Elemente zur Saatregion hinzu, wenn sie das gegebene Prädikat ebenfalls erfüllen. (3) Wenn die Region nicht weiter wachsen kann, nehme das Ergebnis an und verfähre für die verbleibenden Elemente wie vorab (1). Im Fall einer planaren Segmentierung kommen Regionen geringer Krümmung als Saatregionen in Frage. Diese können durch Schätzen lokaler Ebenen ermittelt werden. Das während des Regio-



nenwachstums verwendete Prädikat  $P$  ist durch den maximalen Abstand  $\varepsilon$  des Punktes  $p_j = (x, y, z)^T$  zu der der Region zugeordneten Ebene in Hessesnormalform  $a, b, c, d$  gegeben, d. h. es muss gelten

$$P(p_j) = \text{TRUE} \Leftrightarrow |ax + by + cz + d| < \varepsilon \quad (1)$$

### 5.1.1 Gruppierung von Bildzeilen

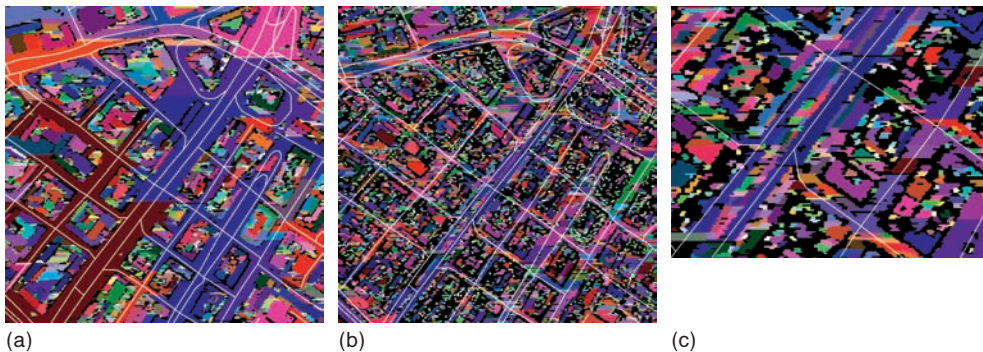
Ein generelles Problem der Bereichswachstumsverfahren ist die aufwändige Berechnung. Dies rührt daher, dass die Elemente einzeln der Saatregion hinzugefügt werden. Für gewöhnlich ist die Neuberechnung der Ebenengleichung nach jeder Addition erforderlich. Ein schnelles Bereichswachstumsverfahren ist von JIANG & BUNKE (1992) vorgestellt worden. Es ist für regularisierte Rasterdaten konzipiert und nutzt die Eigenschaft, dass bei einer Ebene  $z = ax + by + d$  für alle Punkte entlang einer Linie  $y = y_0$  die Gleichung  $z = ax + by_0 + d$  gilt und damit die Geradengleichung  $z = ax + d'$  erfüllt wird. Umgekehrt gilt in den meisten Fällen, dass Punkte, welche die Geradengleichung erfüllen, auch zu genau einer Ebene gehören. Dieser Umstand wird ausgenutzt, um das Wachstum der Regionen nicht elementweise, sondern auf der Basis von kompletten Bildzeilen vorzunehmen. Der Algorithmus stellt sich demnach wie folgt dar. (1) Unterteile jede Bildzeile  $y = y_0$  in Segmente, welche die Gleichung  $z = ax + d'$  erfüllen. Dies erfolgt durch fortschreitende Unterteilung

einer Bildzeile (DOUGLAS & PEUCKER 1973, DUDA & HART 1973). (2) Finde eine Saatregion durch Untersuchung drei aufeinanderfolgender Bildzeilen  $y_{i-1}, y_i, y_{i+1}$ . (3) Füge der gefundenen Saatregion benachbarte Segmente hinzu, solange sie zur gleichen Ebene gehören. (4) Nachbearbeitung: Nach der Gruppierung aller Segmente erfolgt eine Neugruppierung der die Region begrenzenden Punkte, um ein „Ausfransen“ der Ränder zu vermeiden.

Dieser Algorithmus arbeitet schnell und hat in einem Vergleich verschiedener Segmentierungsverfahren sehr gut abgeschnitten (HOOVER et al. 1996). Ein Nachteil besteht in der unterschiedlichen Arbeitsweise in  $x$ - und  $y$ -Richtung. Durch das Unterteilen innerhalb einer Bildzeile und Gruppierung über mehrere Bildzeilen hinweg ist trotz Nachbearbeitung ein Ausfransen der Ränder einer Region in nur einer Richtung zu erwarten.

### 5.1.2 Anwendung zur Segmentierung von Straßen

Abb. 3 stellt einige Ergebnisse für die Anwendung des planaren Segmentierungsverfahrens auf Entfernungsbilder dar. Die Bilder (1 m Rasterweite) zeigen einen Teil der Stadt Stuttgart. Die dem GDF entnommenen (hier nicht verwendeten) Straßenmittellachsen sind der besseren Orientierung halber der Grafik überlagert. Abb. 3(a) gibt die Ergebnisse für den „groben“ Parameterwert

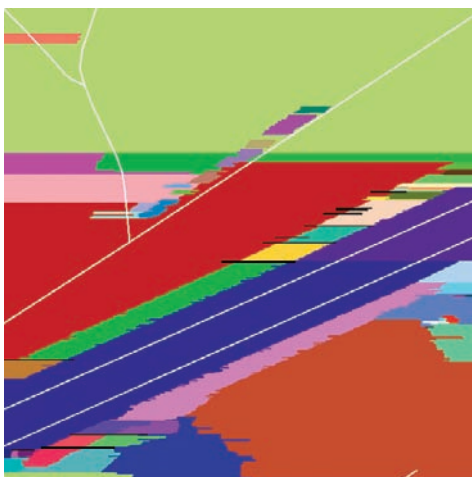


**Abb. 3:** Segmentierungsergebnisse des Jiang & Bunke Algorithmus. (a) Segmentierungsergebnis mit Einstellung „grob“. (b) Segmentierungsergebnis mit Einstellung „fein“. (c) Detaildarstellung von (b).

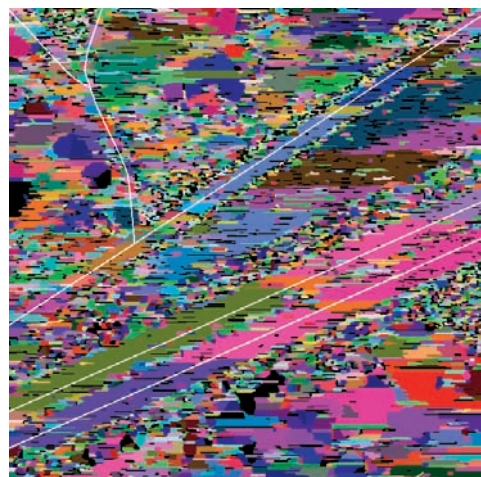
von 1 m für Partitionierung und Gruppierung wieder. Wie der Abbildung zu entnehmen ist, gelingt die Extraktion großer planarer Regionen, von denen die meisten Straßenoberflächen zuzuordnen sind. Gebäude hingegen zeichnen sich durch kleine, fragmentierte Gebiete aus. Wie zuvor erwähnt, sind die linken und rechten Ränder der Regionen erwartungsgemäß ausgefranst, während die oberen und unteren Ränder glatt erscheinen. Da die Eigenschaften des Straßennetzes keine Berücksichtigung finden, kann einem Straßenabschnitt in der Regel mehr als eine Region zugeordnet werden. Eine Verifikation von Straßen könnte erfolgen, indem Regionen entlang eines vorgegebenen Straßennetzes untersucht werden. Die präzise Schätzung des linken oder rechten Randes ist hiermit allerdings nicht möglich. Mit deutlich geringeren, „feineren“ Grenzwerten für die Parameter Partitionierung und Gruppierung im Bereich von 0,1 m ist das Segmentierungsergebnis entsprechend durch eine Vielzahl kleinerer Regionen geprägt, vgl. Abb. 3(b). Trotz der großen Anzahl sind die Straßenoberflächen nach wie vor gut auszumachen. Interessanterweise ist das Verfahren nun bisweilen in der Lage, Richtungsfahstreifen baulich getrennter Fahrbahnen auszumachen.

In offenem, flachem Gelände sind die Ergebnisse nicht so eindeutig, da die Straßen nicht mehr durch die städtische Bebauung flankiert werden. Abb. 4(a) zeigt das Ergebnis für eine Szene, in der eine durch Böschungen begrenzte Bundesautobahn und weitere Straßen enthalten sind, vgl. dazu auch Abschnitt 3.3. Hier können mit der „grob“ Parametrisierung sowohl Böschung als auch Autobahn segmentiert werden, nicht jedoch die anderen Straßen. Mittels „feiner“ Einstellung der Parameterwerte wird erneut eine Vielzahl von Regionen erzeugt, die abermals eine Identifikation der in der Szene enthaltenen Straßenobjekte als schwierig erscheinen lassen, (vgl. Abb. 4b).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Verfahren zur planaren Segmentierung den Vorteil besitzt, auf keine Vorinformationen angewiesen zu sein. Trotzdem werden Straßen oder sogar einzelne Fahrs Spuren teilweise gut erkannt. Die segmentierten Regionen könnten anhand der aus Vorinformation bezogenen Straßenmittellachsen weiter aggregiert werden. Ein anderer Ansatz besteht in der Verwendung der Straßenmittellachse bereits zu einem früheren Zeitpunkt der Segmentierung. Dies wird im nächsten Abschnitt vorgestellt.



(a)



(b)

**Abb. 4:** Segmentierungsergebnisse, Auflösung 0,5 m, ländliches Gebiet. (a) Segmentierungsergebnis mit Einstellung „grob“. (b) Segmentierungsergebnis mit Einstellung „fein“.

## 5.2 Segmentierung entlang von Straßenabschnitten

### 5.2.1 Ein RANSAC basiertes Segmentierungsverfahren

Wie in Abschnitt 5 bereits gefordert, sollte verfügbare Vorinformation soweit als möglich genutzt werden. In diesem Abschnitt wird vorausgesetzt, dass die digitalisierte Straßenmittellachse innerhalb der Ränder des realen Verkehrsweges verläuft. Diese Vorinformation erlaubt eine empfindlichere Segmentierung der tatsächlichen Ausdehnung der Straße. Für den Fall, dass keine  $C^0$ - (Höhe) oder  $C^1$ -Diskontinuität (Neigung) an den Rändern der Straße vorhanden ist, besteht unmittelbar keine Möglichkeit der Detektion mittels Laserscanner-Daten. In einem solchen Fall muss auf andere Datenquellen wie Luftbildaufnahmen zurückgegriffen werden. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie zuverlässig auch kleine Diskontinuitäten aufgedeckt werden können. Eine Straße kann beispielsweise durch Böschungen begrenzt werden, welche recht große Strukturen sind, die zuverlässig extrahiert werden können. Andererseits kann sie auch nur durch eine Bordsteinkante begrenzt sein, so dass zu den angrenzenden Fußgängerwegen oder Verkehrsinseln nur ein Höhenunterschied von 15 cm besteht. In diesem Fall erscheint die Detektion zunächst aussichtslos, da der Betrag in etwa dem Messrauschen des Laserscanners entspricht. Wird die Straße jedoch in Profilen quer zu ihrem Verlauf betrachtet, stehen bei einer angenommenen Breite von 10 m und einer Bodenauflösung von einem Meter durchschnittlich 10 Punkte zur Schätzung der (ebenen) Oberfläche bereit. Für die Standardabweichung des Mittelwertes gilt dann  $15 \text{ cm} / \sqrt{10} \approx 5 \text{ cm}$ . Bei der Approximation der Straßenoberfläche durch eine Ebene scheint die Detektion demnach möglich. Um das Verfahren so sensitiv als möglich zu gestalten kommt nicht mehr das Verfahren nach JIANG & BUNKE (1992) zum Einsatz, vielmehr wird auf das von FISCHLER & BOLLES (1981) vorgestellte Random Sample Consensus Prinzip (RANSAC) zurückgegriffen.

Der Algorithmus verfährt wie folgt: Zunächst wird die gesamte Straße in Querprofil zerlegt. Anschließend wird je Querprofil aus einer zufällig ermittelten Stichprobe ein Punktepaar gewählt, das die Parameter  $a$ ,  $b$ ,  $c$  einer Geradengleichung vorgibt. Der Konsens für das Profil ist dann durch die Menge aller Punkte  $(x, y)^T$  gegeben, welche die Bedingung

$$|ax + by + c| < \varepsilon \quad (2)$$

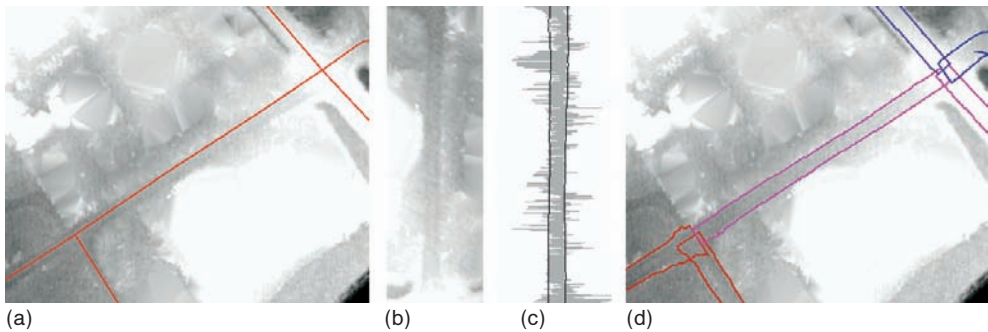
erfüllen. Punktepaare, die nicht zu näherungsweise horizontalen Liniensegmenten führen, können leicht entfernt werden, unter Beachtung dass  $b$  den Kosinus der Neigung des normierten Normalenvektors  $(a, b)^T$  wiedergibt. Aus den verbleibenden Stichproben wird die „beste“ ausgewählt. Als Kriterium hierfür gilt die Länge der größten zusammenhängenden Punktmenge, welche die Straßenmittellachse überlappt.

Zur Zeit werden keine Annahmen über die Breite von Straßen getroffen. Die Schätzung der linken und rechten Straßenseiten erfolgt über einen Medianfilter. Eingabewerte hierfür sind die für die Profile ermittelten linken und rechten Enden der Punktmengen entlang des Straßenverlaufs.

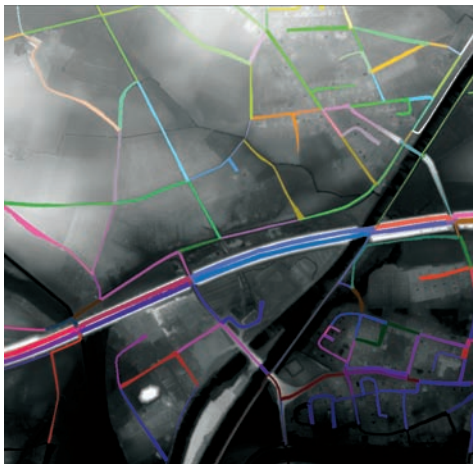
### 5.2.2 Ergebnisse und Diskussion

Abb. 5 zeigt den Ablauf des Verfahrens an einem Beispiel. Ausgehend von einem beliebigen Straßenabschnitt und dem Geländemodell (Abb. 5a) werden mittels linearer Interpolation Profile rechtwinklig zum Straßenverlauf berechnet (Abb. 5b), Auflösung 0,5 m. Der Höhenunterschied zwischen hellen und dunklen Grautönen beträgt hier lediglich 2 m. Die Anwendung der RANSAC Segmentierung auf jede Bildzeile führt zu einer Folge von Segmenten (Abb. 5c). Nach Anwendung der Medianfilterung erfolgt schließlich die Rückprojektion der Ergebnisse in das Geländemodell zwecks visueller Verifikation (Abb. 5d). Im Beispiel beträgt der Wert für die Konsensfindung nach Gleichung (2) 0,05 m.

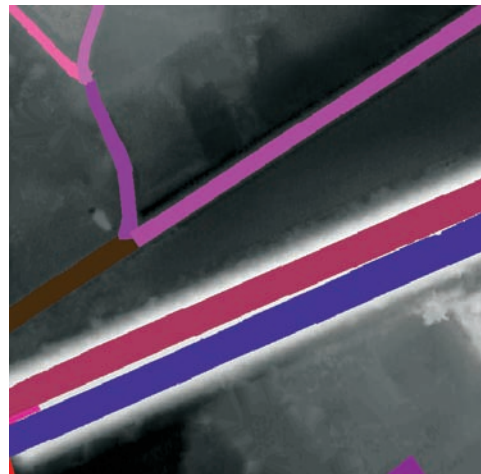
Abb. 6 zeigt das Ergebnis für die in Abb. 1 dargestellte Szene. Der Betrag zur Konsens-



**Abb. 5:** Profilbasierte Segmentierung entlang der Straßemittelachse. (a) DGM überlagert mit Straßemittelachsen. (b) Transformierter Straßenabschnitt. (c) Ergebnis der bildzeilenbasierten Segmentierung (in grau) und Medianfilterung (in schwarz). (d) Überlagerung des DGM mit dem Segmentierungsergebnis.



**Abb. 6:** Segmentierungsergebnisse für das Testgebiet aus Abb. 1.



**Abb. 7:** Detailansicht des Segmentierungsergebnisses für in Abb. 4 dargestellte Gebiet.

findung liegt abermals bei 0,05 m. Eine bemerkenswerte Eigenschaft des Verfahrens ist, dass, obwohl keine Vorgaben über minimale oder maximale Breite eines Straßenabschnittes existieren, die Segmentierung nur in sehr wenigen Fällen ein falsches Ergebnis liefert. Das Verfahren ist auch in der Lage, baulich getrennte Richtungsfahrbahnen im Geländemodell zu verifizieren, vgl. dazu auch Abb. 7. Die Ergebnisse sind jedoch qualitativer Natur und müssen demzufolge noch anhand realer Gegebenheiten überprüft werden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden Methoden für die Kombination existierender Geoinformation mit Laserscanner-Daten untersucht. Ziel ist es dabei, zusätzliche Attribute für zukünftige Straßendatenbanken abzuleiten. Um Straßen in Geländemodellen zu identifizieren nutzt das erste Verfahren einen allgemeinen, planaren Segmentierungsansatz, der auf der Grundlage der Gruppierung von Bildzeilen implementiert ist. Die zweite Methode ist stärker auf die Detektion der Straßengeometrie fokussiert und nutzt die Mit-

telachsen der Straßen sowie eine RANSAC-basierte Segmentierung von Querprofilen.

Auf Grund der Ergebnisse lässt sich schließen, dass Straßenoberflächen in vielen Fällen gut aus Laserscanner-Daten extrahiert werden können. Die planare Segmentierung kann für den Fall, dass die Mittelachse der Straße nicht oder fehlerhaft erfasst wurde, zur näherungsweise Bestimmung der Straßenposition verwendet werden. Demgegenüber kann der profilbasierte Ansatz mit seiner größeren Empfindlichkeit dazu benutzt werden, die Straßenränder auch in relativ flachem Gelände zu detektieren. Voraussetzung hierfür ist allerdings eine relativ genaue Lage der Vorinformation (Straßenmittellachsen).

Eine mögliche Verbesserung besteht in der Erweiterung des profilbasierten Ansatzes auf die Schätzung von Teilflächen entlang linienförmiger Objekte an Stelle der Zerlegung in einzelne Querprofile. Zusätzliches Vorwissen kann in Form der Breite oder der Funktion von Straßen integriert werden. Gegenwärtig werden alle Straßen individuell betrachtet; die Verwendung der Topologie des Straßennetzwerks würde jedoch hier sicherlich Verbesserungen bringen. Schließlich sind auf Grundlage der entwickelten Verfahren quantitative Untersuchungen über die Vollständigkeit und Richtigkeit der erzielten Ergebnisse durchzuführen.

## Danksagung

Dank gilt der TopScan GmbH, Steinfurt sowie der Emscher Genossenschaft, Essen für die Überlassung der Laserscanner-Daten. ATKIS-DLM: © Geobasisdaten: Landesvermessungsamt NRW, Bonn, 1116/2002.

## Literatur

AdV, 1998: Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem (ATKIS). – Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland.

BALTSAVIAS, E., GRÜN, A. & VANGOOL, L., 2001: Automatic Extraction of Man-Made Objects

from Aerial and Space Images. – Balkema Publishers, Netherlands.

- BALTSAVIAS, E.P., 1999a: Airborne laser scanning: basic relations and formulas. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **54** (2-3): 199–214.
- BALTSAVIAS, E.P., 1999b: A comparison between photogrammetry and laser scanning. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **54** (2-3): 83–94.
- BRIESE, C., KRAUS, K., MANDLBURGER, G. & PFEIFER, N., 2001: Einsatzmöglichkeiten der Flugzeuggetragenen Laser Scanner. – Tagungsband der 11. Internationalen Geodätischen Woche, Innsbruck, Österreich: 17–26.
- BRÜGELMANN, R., 2000: Automatic breakline detection from airborne laser range data. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **XXXIII** (B3): 109–116.
- CANNY, J., 1986: A computational approach to edge detection. – *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **8** (6): 679–698.
- CEN TC 287, 1995: Geographic data files version 3.0, GDF for road traffic and transport telematics. – CEN.
- DIAL, G., GIBSON, L. & POULSEN, R., 2001: Ikonos satellite imagery and its use in automated road extraction. – In: BALTSAVIAS et al., 2001: pp. 357–367.
- DOUGLAS, D. & PEUCKER, T., 1973: Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. – *The Canadian Cartographer* **10** (2): 112–122.
- DUDA, R.O. & HART, P.E., 1973: *Pattern Classification and Scene Analysis*. – John Wiley and Sons, New York.
- FGSV, 1996: Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS), Teil Querschnitte (RAS-Q 96). – Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Straßenentwurf, Bonn.
- FISCHLER, M.A. & BOLLES, R.C., 1981: Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. – *Communications of the ACM* **24** (6): 381–395.
- FRI TSCH, D. & SPILLER, R., 1999: *Photogrammetrie Week '99*. – Wichmann, Heidelberg.
- FUCHS, C., 1998: *Extraktion polymorpher Bildstrukturen und ihre topologische und geometrische Gruppierung*. – Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn, Institut für Photogrammetrie, Bonn.

- GRUEN, A., BALSAVIAS, E.P. & HENRICSSON, O., 1997: Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images. – Birkhäuser Verlag, Basel, Schweiz.
- GRUEN, A. & LI, H., 1997: Linear feature extraction with 3-d LSB-snakes. – In: GRUEN et al., 1997: pp. 287–298.
- HARALICK, R.M. & SHAPIRO, L.G., 1992: Computer and Robot Vision. – Vol. I., Addison-Wesley, New York.
- HINZ, S. & BAUMGARTNER, A., 2002: Urban road net extraction integrating internal evaluation models. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXIV (3A-B): 255–265.
- HINZ, S., BAUMGARTNER, A., MAYER, H., WIEDEMANN, C. & EBNER, H., 2001: Road extraction focussing on urban areas. – In BALSAVIAS et al., 2001: pp. 255–265.
- HOOVER, A., JEAN-BAPTISTE, G., JIANG, X.Y., FLYNN, P.J., BUNKE, H., GOLDFOF, D.B., BOWYER, K., EGGERT, D.W., FITZGIBBON, A. & FISHER, R.B., 1996: An experimental comparison of range image segmentation algorithms. – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 18 (7): 673–689.
- JIANG, X.Y. & BUNKE, H., 1992: Fast segmentation of range images into planar regions by scan line grouping. – Technical Report IAM-92-006, Institute of Informatics and Applied Mathematics, University of Berne, Switzerland.
- LOHR, U., 1999: High resolution laserscanning, not only for 3d-city models. – In: FRITSCH & SPILLER, 1999: pp. 133–138.
- PATTNAIK, S.B., HALLMARK, S. & SOULEYRETTE, R., 2003: Collecting road inventory using LIDAR surface models. – Proceedings Map India 2003.
- VOSSELMAN, G., 2000: Slope based filtering of laser altimetry data. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXIII: 935–942.
- VOSSELMAN, G. & DE GUNST, M., 1997: Updating road maps by contextual reasoning. – In: GRUEN et al., 1997: pp. 267–276.
- WEVER, CH. & LINDENBERGER, J., 1999: Experiences of 10 years laser scanning. – In: FRITSCH & SPILLER, 1999: 125–132.
- WILD, D. & KRZYSZEK, P., 1996: Automatic breakline detection using an edge preserving filter. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXI (B3): 946–952.
- ZHANG, C., BALSAVIAS, E. & GRUEN, A., 2001: Updating of cartographic road databases by image analysis. – In: BALSAVIAS et al., 2001: 243–253.

Anschrift der Verfasser:

Dipl.-Ing. CARSTEN HATGER,  
 Dr.-Ing. CLAUS BRENNER  
 Institut für Kartographie und Geoinformatik  
 Universität Hannover, Appelstraße 9a  
 D-30167 Hannover  
 Tel.: +49-511-762 3726  
 Fax: +49-511-762 2780  
 e-mail: carsten.hatger@ikg.uni-hannover.de

Manuskript eingereicht: Dezember 2003  
 Angenommen: Januar 2004

# Gebäudemodellierung in reduzierten Parameterräumen von Flugzeug-Laserscannerdaten

ELLEN SCHWALBE, ALEXANDRA D. HOFMANN & HANS-GERD MAAS, Dresden

**Keywords:** airborne laser scanning, line tracing, building reconstruction

**Zusammenfassung:** Dieser Beitrag beschreibt eine Methode zur Gebäudemodellierung aus Laserscannerdaten, welche auf der Detektierung von Geraden in gezielten 2D-Projektionen der Punktwolke beruht. Der Ansatz beinhaltet, ausgehend von einer gegebenen Vorsegmentierung, die Bestimmung der Ausrichtung des Gebäudes, die Detektierung von Dachflächen, die Gruppierung der Dachflächen zu Gebäudemodellen sowie die Bestimmung der Gebäudegrundrisse.

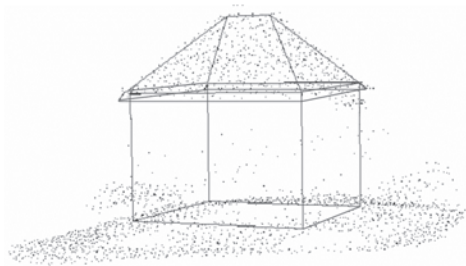
**Summary:** *Building model reconstruction in reduced parameter spaces of airborne laser scanner data.* The article describes a method for the generation of building models from raw airborne laser scanner point clouds, which is based on the detection of straight lines in specific 2D projections of a point cloud. The approach contains the determination of the building orientation, the detection of roof faces, the grouping of the roof planes to a 3D building model and the derivation of the building ground plan.

## 1 Einleitung

### 1.1 Motivation

Die Thematik der Gebäudemodellierung aus Laserscannerdaten hat in den vergangenen Jahren wachsendes Interesse gefunden. Beispiele für die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten sind die Generierung von 3D-Stadtmodellen zur städtebaulichen Planung oder für virtuelle Stadtrundgänge sowie die Informationsgewinnung für Geografische Informationssysteme und deren Folgeprodukte. Weiterhin kann die Gebäudemodellierung der Aktualisierung von Katasterdaten dienen.

Aus diesem Grund werden Methoden entwickelt, mit denen Gebäude aus Laserscannerdaten möglichst vollautomatisch, der Punktdichte entsprechend detailliert, genau und effektiv modelliert werden können (vgl. Abb. 1). Im Hinblick auf die zunehmende Punktdichte und Genauigkeit der Laserscannerdaten ist es zudem von Interesse,



**Abb. 1:** Gebäudemodell aus Laserscannerdaten mit Punktwolke; zum Vergleich Foto des Gebäudes.

Methoden zu entwickeln, welche Daten unterschiedlicher Dichte und Qualität verarbeiten können, und die für eine höhere Punktdichte und Genauigkeit auch entsprechend detailgetreuere Ergebnisse liefern.

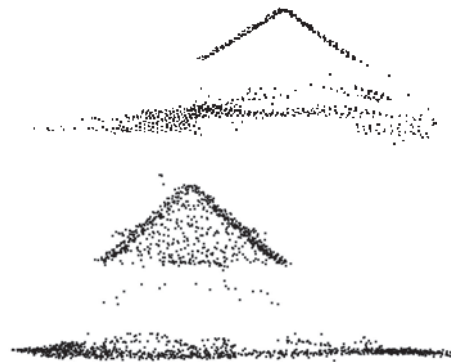
Unter diesen Gesichtspunkten wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Ansätze zur Gebäudemodellierung aus Flugzeuglaserscannerdaten entwickelt. Grundsätzlich kann dabei in Methoden unterschieden werden, welche rein auf der Basis von Laserscannerdaten arbeiten und Ansätze, die in der Lage sind, zusätzliche Datenquellen wie beispielsweise vorhandene GIS-Daten oder Luftbilder einzubeziehen. Eine weitere Unterscheidung klassifiziert in modellbasierte Verfahren, welche von der Annahme eines zu parametrisierenden Gebäudemodells ausgehen (BRENNER & HAALA 1998, MAAS 1999) und datenbasierte Verfahren (VOSSELMAN 1999, ROTTENSTEINER & BRIESE 2002), welche versuchen, geometrische Primitive in segmentierten Punktwolken zu detektieren und diese nach vorgegebenen Regeln zu Gebäuden zu kombinieren. Als dritte Kategorisierung kann in Methoden unterschieden werden, welche die originalen Laserscannerpunkte nutzen, und solche, die – meist mit dem Ziel der Nutzung bestehender Bildverarbeitungswerkzeuge – auf einer Interpolation der Originaldaten auf ein regelmäßiges Raster basieren.

Das im Folgenden vorgestellte Verfahren basiert ausschließlich auf nicht interpolierten Laserscannerdaten um zunächst das Potential dieser Datenquelle nachzuweisen.

## 1.2 Zielstellung und Grundidee

Das Ziel der hier vorgestellten Methode ist die automatische Gebäuderekonstruktion aus Flugzeug-Laserscannerdaten ohne die Nutzung von Zusatzinformationen.

Die Idee, die der entwickelten Methode zugrunde liegt, ergibt sich aus der Überlegung, wie ein menschlicher Betrachter in einer Punktwolke ein Gebäude erkennt. Die wesentlichsten Informationen werden beim Drehen der Punktwolke durch die Betrachtung der Giebelseite des Gebäudes erhalten. Es ist zu erkennen, dass sich Dachflächen,



**Abb. 2:** Punktwolken eines Satteldaches (oben) und eines Walmdaches (unten), von der Giebelseite des jeweiligen Gebäudes aus betrachtet.

wenn sie in eine Vertikalebene parallel zur Giebelseite des Gebäudes projiziert werden, als Geraden abbilden (vgl. Abb. 2).

Aus dieser Blickrichtung lassen sich die Dachart des Gebäudes sowie die Anzahl, die Neigung und die Breite der Dachflächen abschätzen. Diese Informationen sollen in der zu entwickelnden Methode genutzt werden, um Dachflächen zu detektieren. Dazu ist die Ausrichtung des Gebäudes zu bestimmen, und die Datenpunkte sind in die entsprechende Vertikalebene zu projizieren. In diesen Projektionen werden Geraden gesucht, welche Dachflächen repräsentieren. Eine ähnliche Idee wurde bei VOSSELMAN & DIJKMAN (2001) angesprochen. Diese Geraden sollen schließlich zu Dachflächen erweitert und zu einem Gebäudemodell gruppiert werden. Die Detektierung von Dachflächen wird somit auf zweidimensionale Parameterräume reduziert, was eine Verminderung der Rechenzeit und eine effektive Arbeitsweise des Algorithmus erwarten lässt.

## 2 Daten

Die beschriebene Methode wurde an zwei verschiedenen Datensätzen getestet, die sich durch ihre Punktdichte und Art der enthaltenen Gebäude unterscheiden:

Der erste Datensatz liegt in den Schweizer Voralpen. Die Punktdichte beträgt ca. einen Punkt pro Quadratmeter. Das Gebiet ist gekennzeichnet durch Einzelhausbebauung



und einfache Gebäudestrukturen. Vorwiegend handelt es sich um einfache oder kombinierte Satteldächer. Eine spezielle Eigenheit der Gebäude dieses Datensatzes ist, dass sie teilweise in den Hang hineingebaut sind. Das entwickelte Modellierungsverfahren wurde an 229 Gebäuden dieses Datensatzes getestet, um seine Effektivität zu ermitteln.

Bei diesem Datensatz handelt es sich um unregelmäßig verteilte Laserscannerdaten. Der Ansatz geht von einer vorliegenden Segmentierung des Datensatzes aus (HOFMANN et al. 2003), wobei Gebäudesegmente häufig noch umgebende Bodenpunkte oder Punkte angrenzender Vegetation enthalten. Die Punktdichte der Datensätze resultiert aus mehreren sich stark überlappenden Flugstreifen.

Als zweiter Datensatz wurde ein Gebiet im innerstädtischen Bereich der Stadt Dresden verwendet. Hierbei handelt es sich um Daten mit einem Punktabstand von einem Meter. Dieser Datensatz dient einem Vergleich der modellierten Gebäude mit Daten, die durch klassische Vermessung gewonnen wurden.

### 3 Verfahren

#### 3.1 Modell

Die Vielfalt der existierenden Dachformen stellt unterschiedliche Ansprüche an einen Algorithmus zur Gebäudemodellierung. Nicht alle Details und Formen, die in der Realität auftreten, können modelliert werden. Deshalb ist es im Vorfeld notwendig, eine gewisse Modellvorstellung eines Gebäudes zu erarbeiten. Zu diesem Zweck werden Vorüberlegungen zu Gebäudeformen und gemeinsamen Eigenschaften von Gebäuden durchgeführt.

Es wird davon ausgegangen, dass Gebäude aus ebenen Flächen bestehen. Die grundlegenden Dachformen, die mit dem vorliegenden Algorithmus modellierbar sein sollen, sind Satteldächer, Pultdächer und Walmdächer sowie Kombinationen aus diesen Grundformen. Eine erste einschränkende Annahme ist, dass Gebäude maximal

zwei Hauptrichtungen besitzen, welche orthogonal zueinander sind. Die Normalenvektoren aller Dachflächen sollten orthogonal zu einer der Hauptrichtungen sein. Die Hauptrichtungen des Gebäudes werden durch die Ausrichtung der Dachfirste definiert bzw. durch die Ausrichtung der Gebäudekanten.

Um komplexere Gebäude zu modellieren, wie Gebäude mit kombinierten Dachformen, ist es notwendig, weitere Annahmen zu machen. Ein Gebäude kann mehrere Dachfirste unterschiedlicher Höhe besitzen. In der derzeitigen Implementation sollten sie parallel oder orthogonal zueinander sein. Zudem wird angenommen, dass die Traufe parallel zum Dachfirst verläuft und der Dachfirst parallel zur Horizontalebene liegt. Die Wände eines Gebäudes sind senkrechte ebene Flächen und schließen an die äußeren Dachkanten an. Gegenüberliegende Dachflächen, die sich in einer Dachfirstlinie schneiden, besitzen nicht notwendigerweise die gleiche Neigung.

#### 3.2 Überblick

Die Datengrundlage für den vorliegenden Algorithmus bilden segmentierte Laserpunktwolken, die jeweils ein potentielles Gebäude repräsentieren. Die einzelnen Punktwolken werden sukzessive nach folgendem Schema verarbeitet:

- a) Einlesen der Punktkoordinaten und Reduktion auf schwerpunktbezogene Koordinaten
- b) Eliminierung von vermeintlichen Bodenpunkten
- c) Bestimmung des Azimuts der Hauptdachfirstrichtung und Rotation der Datenpunkte um diesen Winkel um die z-Achse
- d) Projektion der Datenpunkte in die z-x- und z-y-Ebene
- e) Suche nach Geraden in diesen projizierten Punkten und Ermittlung der Ausdehnungen der Dachebenen, die durch die Geraden repräsentiert werden
- f) Ermittlung von Aussparungen
- g) Nachbearbeitung detektierter Dachflächen

- h) Verschneidung der Ebenen aus unterschiedlichen Projektionen
- i) Ermittlung der Wandebenen unter Einbezug des Dachüberstandes
- j) Bestimmung des Grundrisspolygons und Visualisierung des Gebäudes als VRML-Modell

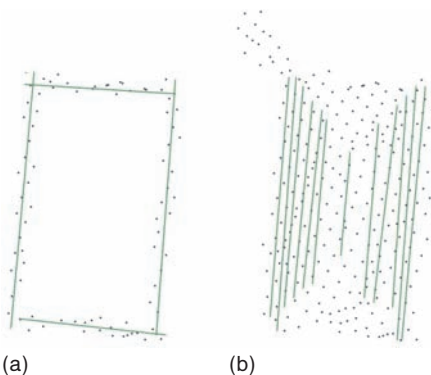
### 3.3 Bestimmung der Dachfirstrichtung

Da die Methode auf dem Prinzip der Linien-suche in Projektionen der Punktwolke orthogonal zur Dachfirstrichtung beruht, ist als erster Arbeitsschritt die Bestimmung der Hauptrichtung des Gebäudes nötig.

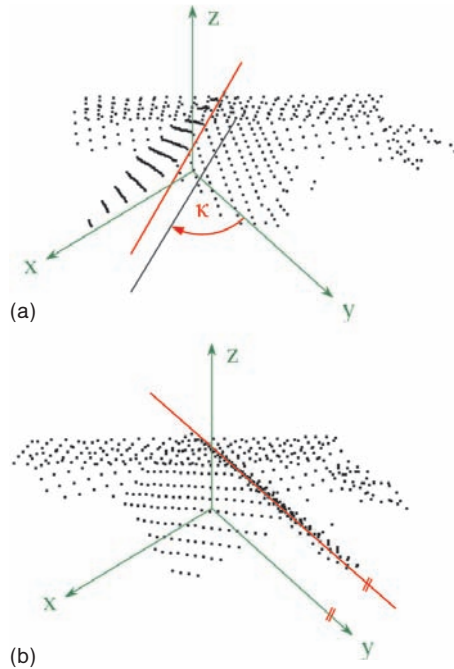
Zuvor werden potentielle Bodenpunkte mittels einer Höhenhistogramm-Analyse aus dem Datensatz eliminiert. Das Minimum an Laserpunkten in den Höhenschichten im Bereich der Hauswände dient dabei als Kriterium zur Trennung von Dach- und Bodenpunkten.

Mit den verbliebenen Gebäudepunkten erfolgt die Suche nach der Dachfirstrichtung des Gebäudes. Darunter ist das Azimut  $\kappa$  des Hauptdachfirstes zu verstehen (vgl. Abb. 4a).

Das dazu angewandte Prinzip beruht auf der Untersuchung der Verteilung der Punkte in einzelnen Höhenschichten der Punktwolke. Nicht nur das Höhenintervall, in welchem Dachfirstpunkte enthalten sind, lässt die Ausrichtung des Gebäudes erkennen,



**Abb. 3:** a) Linien einer Höhenschicht; b) Linien aller Höhenschichten, welche die Hauptrichtung definieren.



**Abb. 4:** a) Dachfirstrichtung; b) um den Winkel  $-\kappa$  rotierte Punktwolke.

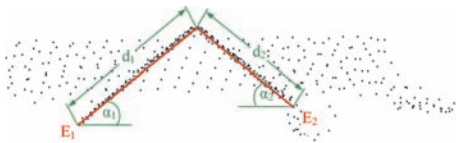
auch tiefere Höhenschichten innerhalb der Dachpunkte enthalten diese Information.

Die Idee besteht darin, in den Punkten der einzelnen Höhenschichten des Datensatzes nach Geraden zu suchen (vgl. Abb. 3a). Im Bereich des Daches entspricht die am häufigsten auftretende Richtung der detektierten Geraden einer der beiden Hauptrichtungen des Gebäudes (vgl. Abb. 3b). Die Verteilung der Punkte in Höhenschichten durch Vegetationsbereiche hat dagegen Zufallscharakter.

Als Richtung des Hauptdachfirstes wird zunächst die ausgeprägteste Richtung der detektierten Geraden angenommen. Anschließend wird die Punktwolke um das ermittelte Azimut  $\kappa$  um die z-Achse rotiert, so dass die Hauptrichtung (der Hauptdachfirst) des Gebäudes parallel zur y-Achse verläuft (vgl. Abb. 4b).

### 3.4 Detektierung von Dachflächen

Im nächsten Schritt werden die Punkte in die Vertikalebene projiziert. Zuerst erfolgt



**Abb. 5:** Neigung und Breitenausdehnung detektierter Dachebenen.

die Projektion in die z-x-Ebene. Punkte, die dabei auf einer Dachfläche liegen, deren Normalenvektor parallel zur Projektionsebene ist, werden als eine Gerade abgebildet.

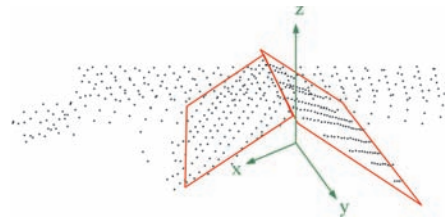
In der Projektion werden die Geraden, welche Dachflächen repräsentieren, detektiert, miteinander verschnitten, und ihre Endpunkte werden bestimmt (SCHWALBE 2003).

Bei hoher Punktdichte kann sich die Notwendigkeit einer temporären Ausdünnung der projizierten Punkte ergeben, um die Zuverlässigkeit der Linienverfolgung zu steigern. Anhand des Anstieges und der Endpunkte der Geraden werden die Neigung und die Breitenausdehnung der durch sie repräsentierten Dachflächen ermittelt (vgl. Abb. 5).

Die einzelnen Geraden sollen nun zu Flächen erweitert werden. Die z- und x-Koordinaten der Eckpunkte des Ebenenpolygons sind bekannt durch die ermittelten Geradenendpunkte (vgl. Abb. 5).

Die y-Koordinaten der Eckpunkte werden nach folgendem Verfahren bestimmt: Alle Punkte, die einer Geraden zugeordnet werden können, werden um den Anstiegswinkel der entsprechenden Geraden in die Horizontale rotiert. Danach werden die Punkte in die z-y-Ebene projiziert, wo sie sich als horizontale Gerade abbilden. Durch deren Detektierung und die Bestimmung ihrer Endpunkte können die y-Koordinaten des Ebenenpolygons festgelegt werden. Jede einzelne Gerade der z-x-Projektion wird auf diese Weise zu einem rechteckigen dreidimensionalen Dachflächenpolygon erweitert (vgl. Abb. 6).

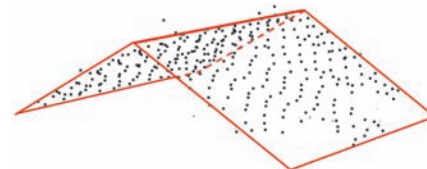
Nicht alle Dachflächen sind mit dieser rechteckigen Form optimal beschrieben. Abb. 7a zeigt das Beispiel einer Dachfläche mit Vordach, die gewisse Aussparungen aufweist. Um diese Einkerbungen zu bestimm-



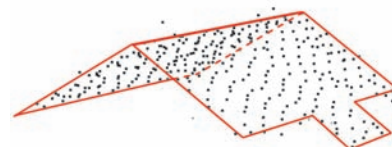
**Abb. 6:** Erweiterung der Geraden zu Dachflächen.

men, werden zunächst alle Punkte ermittelt, die innerhalb der vorläufigen Grenzen in der Dachebene liegen. Diese Punkte werden um den Neigungswinkel der Ebene in die Horizontale rotiert und in die x-y-Ebene abgebildet. In dieser Projektion werden die Einkerbungen der jeweiligen Dachebene detektiert und das Ebenenpolygon entsprechend erweitert (vgl. Abb. 7b). Die Detektierung der Aussparungen erfolgt durch die streifenweise Untersuchung der Ebene unter Berücksichtigung der Punktdichte in der jeweiligen Fläche.

Da angenommen wird, dass ein Gebäude zwei orthogonale Hauptrichtungen besitzen kann, erfolgt anschließend eine weitere Projektion aller Datenpunkte in die z-y-Ebene. Für diese zweite Projektion werden die analogen Arbeitsschritte wie für die Projektion in die z-x-Ebene durchgeführt. Bei dem Beispieldatensatz aus Abb. 6 handelt es sich um ein kombiniertes Satteldach mit T-förmig-



(a)



(b)

**Abb. 7:** Modellierung von Einkerbungen: a) Dachfläche mit Einkerbungen; b) Angepasstes Dachflächenpolygon.

gem Grundriss und vier Dachflächen. Zwei der Flächen werden in der ersten Projektion (z-x-Projektion) gefunden, die beiden anderen in der zweiten Projektion (z-y-Projektion).

### 3.5 Rekonstruktion des Gebäudes

Als Ergebnis der Auswertung beider Projektionen liegen nun die dreidimensionalen Polygone aller detektierbaren Dachflächen des Gebäudes vor. Alle Flächen, die aus ein und derselben Projektion stammen, sind untereinander verschnitten, da die Geraden in den einzelnen Projektionen bereits verschnitten wurden (vgl. Abb. 5).

Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Bestimmung der Firstrichtung besteht hier durch die jeweilige Ermittlung einer ausgleichenden Ebene für die Punkte, die einer Geraden zugeordnet werden können, und die Bestimmung eines verbesserten Dachfirstes durch die Verschneidung der so ermittelten Dachebenen. Mit der neuen Firstrichtung kann dann rekursiv eine erneute Projektion und Liniensuche durchgeführt werden.

Im Anschluss an die Detektierung der Dachebenen sind verschiedene Nacharbeitungsschritte notwendig. Zum einen können unter den gefundenen Flächen Fehlflächen vorhanden sein. Die Ursache dafür sind z. B. Bodenpunkte, die fälschlicherweise nicht aus dem Datensatz entfernt wurden. Deshalb werden alle detektierten Flächen daraufhin untersucht, ob es sich um relevante Dachflächen handelt. Ebenen, die zu klein sind oder zuwenig Punkte im Verhältnis zum Flächeninhalt besitzen, werden ausgesondert. Zum anderen tritt folgendes Problem auf: Für zwei Dachebenen, die sich in einer Dachfirstlinie schneiden, liegen die beiden oberen horizontalen Randlinien der Ebenen auf einer Geraden. Die Endpunkte dieser Randlinien stimmen jedoch nicht überein, sondern sind leicht versetzt. Ist dieser Versatz geringer als der mittlere Punktabstand der Laserscannerdaten, wird er angeglichen, so dass die beiden Dachebenen in einer Vertikalebene abschließen.

Bei vielen Datensätzen werden Ebenen in den projizierten Punkten der z-x- sowie der

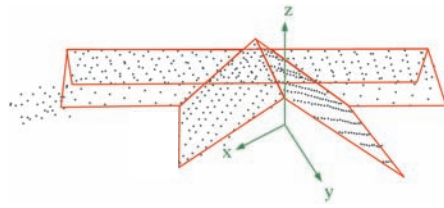


Abb. 8: Verschnittene Dachflächen.

z-y Ebene gefunden. In diesen Fällen müssen noch diejenigen Flächen miteinander verschnitten werden, die aus unterschiedlichen Projektionen stammen (SCHWALBE 2003). Damit ist die Modellierung des Gebäudedaches abgeschlossen (vgl. Abb. 8).

Zur Vervollständigung des Gebäudemodells werden im nächsten Schritt Polygone ermittelt, welche die Wände des Gebäudes beschreiben. Dabei können ein vordefinierter Dachüberstand angenommen und die Hauswände entsprechend eingerückt werden. Als Höhenniveau für die Unterkanten der Wandflächen wird die mittlere Höhe der zuvor eliminierten Bodenpunkte angenommen. Durch Projektion der Wandflächen in die x-y-Ebene wird der Grundriss des Gebäudes erhalten. Die Eckpunkte des Grundrisspolygons werden ermittelt.

Die Ebenenpolygone werden zu einem polyedrischen Gebäudemodell zusammengegruppert und als VRML-Modell visualisiert (vgl. Abb. 9).

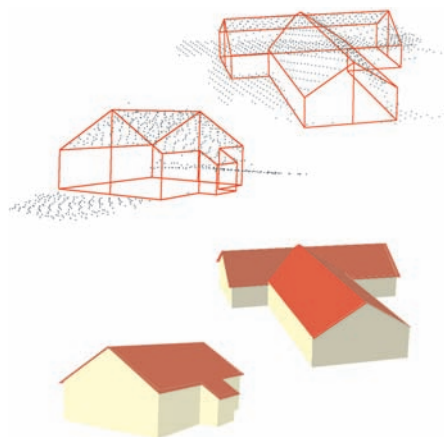


Abb. 9: Als VRML Modelle visualisierte Gebäude.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Auswertbarkeit

Die Qualität der Modellierungsergebnisse der beschriebenen Methode hängt von der Datenqualität und Komplexität des Gebäudes ab, welches zu modellieren ist. Im Folgenden werden die Ergebnisse in korrekt, teilweise korrekt und fehlerhaft modellierte Gebäude unterschieden. Die Hauptursachen für fehlerhaft modellierte Gebäude sind:

- a) Lücken in den Punktwolken
- b) Starke Streuung der Punkte aufgrund bestimmter Dacheigenschaften oder durch Diskrepanzen zwischen sich überlappenden Flugstreifen
- c) Gebäude, welche in den Hang hinein gebaut sind
- d) Sehr kleine Gebäude mit wenig Punkten
- e) Geringe Dachneigungen
- f) Das Gebäude entspricht nicht der in Absatz 3.1 beschriebenen Modellvorstellung

Zur Bestimmung der Auswertbarkeit von Gebäuden mit der vorliegenden Methode wurde der Schweizer Datensatz verwendet. Die Gesamtanzahl der ausgewerteten Punktwolken beträgt hier 229. Davon waren 29% der Punktwolken nicht auswertbar, 9% der Gebäude wurden mit kleinen Fehlern modelliert und 62% der Gebäude wurden erfolgreich ausgewertet. Die Verifikation erfolgte durch visuellen Vergleich der VRML-Modelle mit den zugehörigen Punktwolken.

### 4.2 Detaillierbarkeit

Der Detaillierungsgrad modellierter Gebäude hängt vom Verhältnis der Größe der Details zur Punktdichte der Laserscannerdaten sowie von der Wahl der Ausdünnparameter ab. Die Auswertung zahlreicher Punktwolken hat gezeigt, dass ein Minimum von ca. 10 Punkten pro Fläche notwendig ist, um in der Projektion die Gerade detektieren zu können, welche die entsprechende Fläche repräsentiert. Weiterhin wird die Definition des Grundrisses vage, wenn nur wenige Punkte in einer Fläche enthalten sind.

Bei einer Punktdichte von ca. einem Punkt pro Quadratmeter (Schweizer Datensatz) bedeutet dies, dass Flächen erst ab einer Größe von etwa zehn Quadratmetern modelliert werden können. Somit tendiert das Verfahren eher zur Generalisierung. Kleinere Details wie Dachgauben oder Schornsteine werden in der Regel nicht modelliert. Im Gegenzug dafür ist die Methode jedoch wenig anfällig für starke Streuungen in den Laserdaten oder auftretendem Höhenversatz zwischen einzelnen Flugstreifen.

### 4.3 Terrestrischer Vergleich

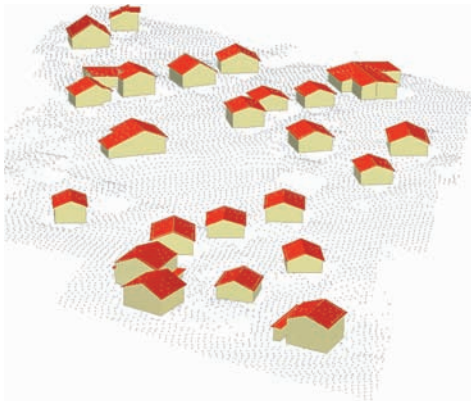
Um die absolute Genauigkeit der modellierten Gebäude zu bestimmen, erfolgte für eine statistische Auswahl unterschiedlicher Gebäudetypen aus dem Datensatz Dresden ein Vergleich aller Eckpunkte des Gebäudemodellldaches mit terrestrisch bestimmten Koordinaten für diese Punkte. Die mittleren Abweichungen betragen in der Lage  $\pm 0,46$  m und in der Höhe  $\pm 0,25$  m. Die Genauigkeit in der Höhe ist deutlich besser als die Lagegenauigkeit. Dies ist auf die bessere Höhengenaugigkeit der Laserscannerdaten zurückzuführen (MAAS 2003). Die Genauigkeit der Lagekoordinaten dagegen wird im Wesentlichen durch die Punktdichte (mittlerer Punktabstand ca. 1 m) eingeschränkt.

## 5 Ausblick

Die Methode eignet sich zur Modellierung der wesentlichsten Grundtypen von Gebäuden sowie von einfachen Kombinationen dieser Grundtypen (vgl. Abb. 10). Vorteile des Verfahrens liegen in der effektiven Arbeitsweise und der geringen Empfindlichkeit gegenüber sub-optimalen Laserscannerdaten. Ein breites Spektrum unterschiedlicher Punktdichten kann verarbeitet werden.

Ein Nachteil ist die Beschränkung der auswertbaren Gebäude auf Gebäudetypen mit maximal zwei orthogonalen Firstrichtungen. Dies kann verbessert werden, indem die Punktwolken in kleineren Winkelintervallen als  $90^\circ$  projiziert werden.

Zudem kann eine Anzahl von Erweiterungen in Betracht gezogen werden, um die



**Abb. 10:** Modelliertes Gebiet mit einfacher Einzelhausbebauung.

Anwendbarkeit der Methode zu steigern: Zusätzlich zur Suche nach Geraden kann z. B. die Detektierung von Kreissegmenten in den projizierten Punkten erfolgen. Auf diese Weise können eventuell gewölbte Dachelemente auswertbar gemacht werden. Um auch komplexere Gebäude auswerten zu können, sollte in Betracht gezogen werden, die Gebäude in kleinere Primitive zu zerlegen, wie es bei BRENNER & HAALA (1998) vorgestellt wurde. Der Methode kann z. B. auch eine Segmentierung vorgeschaltet werden, durch welche Punkte ausgewählt werden, die zu Flächen gleicher Ausrichtung gehören. Diese Ausrichtungen sind dann zu bestimmen, um für jede von ihnen mit den zugehörigen Punkten eine separate Projektion und Liniensuche durchzuführen. Neben diesen Möglichkeiten, das Verfahren zu erweitern, bietet sich die Methode selbst auch zur Kombination mit anderen Gebäuderekonstruktionsmethoden an.

## 6 Danksagung

Für die Unterstützung der Arbeiten und die Bereitstellung von Daten danken wir dem Schweizer Bundesamt für Landestopographie (Datensatz Schweiz), der Milan Flug GmbH (Datensatz Freiberg) sowie der Landestalsperrenverwaltung Sachsen (Datensatz Dresden).

## 7 Literatur

- BRENNER, C. & HAALA, N., 1998: Rapid acquisition of virtual reality city models from multiple data sources. – *IAPRS* **32** (5): 323–330.
- HOFMANN, A. D., MAAS, H.-G. & STREILEIN, A., 2003: Derivation of roof types by cluster analysis in parameter spaces or airborne laserscanner point clouds. – *ISPRS Com. III/3*, Dresden, Germany, 08.–10. October
- MAAS, H.-G., 1999: Closed solution for the determination of parametric building models from invariant moments of airborne laserscanner data. – *IAPRS* **32** (3-2W5): 193–199.
- MAAS, H.-G., 2003: Planimetric and height accuracy of airborne laserscanner data. – User requirements and system performance. Proceedings 49. Photogrammetric Week (Ed. D. Fritsch), Wichmann Verlag.
- ROTTENSTEINER, F. & BRIESE, C., 2002: A new method for building extraction in urban areas from high-resolution LIDAR data. – *IAPRS* **34** (3A): 295–301.
- SCHWALBE, E., 2003: Gebäudemodellierung in reduzierten Parameterräumen von Airborne Laserscannerdaten. – Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung TU-Dresden, <http://www.tu-dresden.de/fghgipf/lehre/diplomarbeiten/schwalbe/DASchwalbe.pdf>
- VOSSELMAN, G., 1999: Building Reconstruction using Planar Faces in Very High Density Data. – *IAPRS* **32** (3-2W5): 87–92.
- VOSSELMAN, G. & DIJKMAN, S., 2001: 3D building model reconstruction from point clouds and ground plans. – *ISPRS* **34** (3W4): 37–44.

Anschrift der Autoren:

Dipl.-Ing. ELLEN SCHWALBE  
Ellen.Schwalbe@mailbox.tu-dresden.de

Dipl.-Ing. ALEXANDRA HOFMANN  
Alexandra.Hofmann@mailbox.tu-dresden.de

Prof. Dr. habil. HANS-GERD MAAS  
hmaas@rcs1.urz.tu-dresden.de

Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung,  
Technische Universität Dresden  
Helmholtzstr. 10, D-01069 Dresden  
Tel.: +49-351-463 32645  
Fax: +49-351-463 37266

Manuskript eingereicht: März 2004  
Angenommen: April 2004

## Detektion und Modellierung von 3D-Objekten aus flugzeuggetragenen Laserscannerdaten

THOMAS VÖGTLE & EBERHARD STEINLE, Karlsruhe

**Keywords:** geoinformatics, laserscanning, object detection, object classification, 3D building modelling, 3D vegetation modelling

**Zusammenfassung:** In diesem Beitrag sollen zwei Schwerpunkte behandelt werden: zum einen die automatische Detektion und Klassifizierung von 3D-Objekten aus Daten flugzeuggetragener Laserscanner, zum anderen deren automatisierte geometrische Modellierung. Als Objekte werden hier Vegetation (Bäume, Büsche), Gebäude und Gelände behandelt. Bei der geometrischen Modellierung soll in diesem Artikel insbesondere auf die Vegetationsobjekte eingegangen werden, nachdem die Modellierung von Gebäuden bereits mehrfach detailliert dargestellt wurde (z. B. STEINLE & VÖGTLE 2001, VÖGTLE & STEINLE 2003). Ein spezieller Flächenwachstumsalgorithmus segmentiert zunächst 3D-Objekte auf der Geländeoberfläche. Für diese Segmente werden nun objektspezifische Merkmale extrahiert, wie z. B. Form, Höhentextur oder Randgradienten, anhand derer eine Klassifizierung mittels *fuzzy logic* durchgeführt wird. Anschließend kann nun die geometrische Modellierung dieser 3D-Objekte erfolgen, die für die beiden relevanten Klassen *Gebäude* und *Vegetation* jeweils auf spezifischen Ansätzen basiert. Vegetationsobjekte werden hierbei durch generalisierte Rotationsellipsoide beschrieben.

**Summary:** *Detection and modelling of 3-D objects from airborne laserscanning data.* In this paper, two main aspects of analysing airborne laserscanning data are presented: automatic detection and classification of 3-D objects and their automated geometric modelling. The detection method refers to vegetation, building and terrain objects (e. g. rocks etc.). Concerning geometric modelling, this article will concentrate on vegetation objects; the methodology of modelling buildings has already been presented in detail (e. g. STEINLE & VÖGTLE 2001, VÖGTLE & STEINLE 2003). In a first step a specific region growing algorithm determines 3-D objects on the terrain. For these segments object-specific features (e. g. shape, height texture, border gradients etc.) are extracted and used in a subsequent fuzzy logic classification. Afterwards, the geometry of these 3-D objects is modelled. Trees and bushes will be approximated in this approach by generalized rotational ellipsoids.

---

### 1 Einleitung

Flugzeuggetragenes Laserscanning hat als Erfassungsmethode für Geländeoberflächen und der darauf befindlichen 3D-Objekte – aufgrund der hohen Punktdichte und Genauigkeit – sehr stark an Bedeutung gewonnen (z. B. WEHR & LOHR 1999, ACKERMANN 1999). Die Extraktion und Modellierung

solcher 3D-Objekte aus Laserscannerdaten ist eine aktuelle Problemstellung. Dabei ist für viele – insbesondere großflächige – Anwendungen eine weitgehende Automatisierung der Analyseprozesse von ausschlaggebender Bedeutung.

Die hier vorgestellten Verfahren wurden im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 461 „Starkbeben“ entwickelt. Ein Ziel ist

hierbei, Grobschäden an Gebäuden zu erkennen. Als Basis dienen flugzeuggetragene Laserscannerdaten, die auch bei Nacht und ungünstigeren Witterungsverhältnissen erfasst werden können. Daher müssen alle benötigten Informationen ausschließlich aus den Laserscannerdaten selbst abgeleitet werden. Entsprechende Laserdaten wurden uns freundlicherweise von der Fa. TopoSys bereitgestellt.

Die Konzeption dieses Ansatzes sieht vor, zunächst alle wesentlichen 3D-Objekte auf der Geländeoberfläche – dies sind in erster Linie Gebäude und Vegetation – zu segmentieren. Nach der Extraktion objektspezifischer Merkmale (wie z. B. Höhentextur, Form oder Randgradienten) innerhalb der gefundenen Segmentbereiche können diese 3D-Objekte klassifiziert werden. Eine solche Klassifizierung ist für eine Vielzahl von Aufgaben von großer Bedeutung. Nur mit dem Wissen, um welche Objekte es sich handelt, kann eine geeignete geometrische Modellierung, wie sie hier vorgestellt wird, vorgenommen werden. Andererseits läßt sich auch die Extraktion der Punkte auf der Geländeoberfläche (Filterung), z. B. zur Generierung eines DGM, wesentlich verbessern.

## 2 Detektion und Klassifizierung von 3D-Objekten

Zur Detektion der 3D-Objekte wird zunächst aus den Original-Laserdaten (= *digitales Oberflächenmodell*, DOM) ein *digitales Geländemodell* (DGM) mit Hilfe speziell entwickelter Filtertechniken abgeleitet. Danach wird ein sog. *normalisiertes Oberflächenmodell* (nDOM) berechnet (vgl. z. B. SCHIEWE 2001), in dem nur noch die 3D-Objekte auf der Erdoberfläche abgebildet sind. Diese lassen sich nun mit Hilfe eines speziellen Flächenwachstumsverfahrens segmentieren.

### 2.1 Extraktion eines DGM aus den Laserscannerdaten

Zur Extraktion eines DGM aus dem Original-DOM (Abb. 1) müssen alle Laserpunkte, die nicht die Geländeoberfläche reprä-

sentieren (z. B. Laserpunkte auf Gebäuden und Vegetation), erkannt und eliminiert werden. Dazu existiert eine ganze Reihe unterschiedlicher Ansätze, wie z. B. in SITHOLE & VOSSELMANN (2003) zusammengestellt. In dieser Arbeit wurde das Verfahren der *konvex-konkaven Hülle* eingesetzt (VON HANSEN & VÖGTLE 1999), eine Methode basierend auf einem TIN (*triangulated irregular network*); ein ähnlicher Ansatz findet sich z. B. auch in AXELSSON (1999). Dieses Verfahren bietet den Vorteil einer extrem kurzen Laufzeit und einer robusten Extraktion der Geländepunkte. Ein so extrahiertes DGM ist in Abb. 2 wiedergegeben.

### 2.2 Segmentierung von 3D-Objekten im nDOM

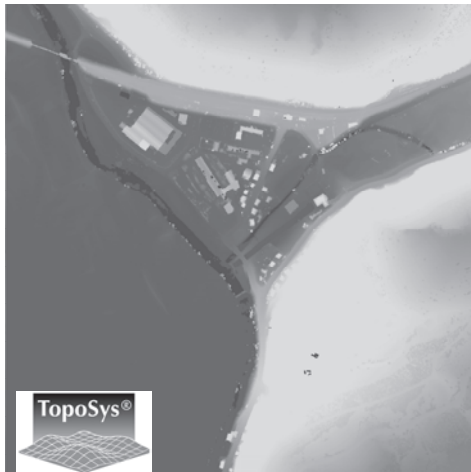
Aus dem Original-DOM (Abb. 1) und dem daraus abgeleiteten DGM (Abb. 2) kann nun leicht ein sog. *normalisiertes Oberflächenmodell* (nDOM) berechnet werden (Abb. 3):

$$nDOM = DOM - DGM \quad (1)$$

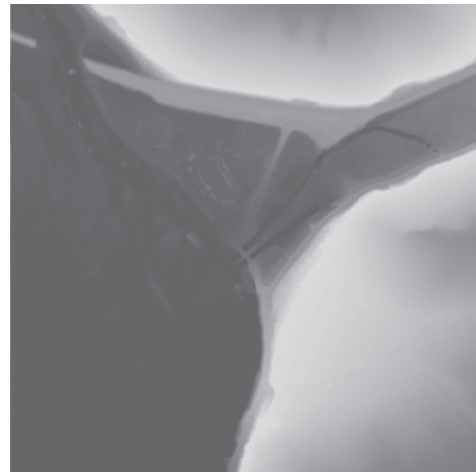
Darin sind nur noch 3D-Objekte enthalten, die aus der Geländeoberfläche (DGM) herausragen, z. B. Bäume und Gebäude, aber auch extreme Geländeformationen, wie z. B. Felsen, schroffe Geländekanten oder Steilabbrüche, wie sie im rechten und oberen Teil der Abb. 3 zu sehen sind. Die Dimension dieser DGM-Fehler (hier: bis zu 25 m Höhenabweichung vom realen Gelände) hängt von der Geländekrümmung ab; diese Fehler können jedoch nach der Klassifizierung beseitigt werden.

Als Startelement (Kristallisationsbereich) des speziellen Flächenwachstumsverfahrens zur Objektsegmentation dient eine Punktumgebung, innerhalb derer alle Punkte eine bestimmte Höhe im nDOM übersteigen müssen. Es werden nun alle Nachbarpunkte in die bereits detektierte Segmentfläche integriert, deren Höhendifferenz hierzu kleiner als ein maximal zulässiger Wert ist (Homogenitätskriterium). Abb. 4 zeigt die hiermit gebildeten Segmente.

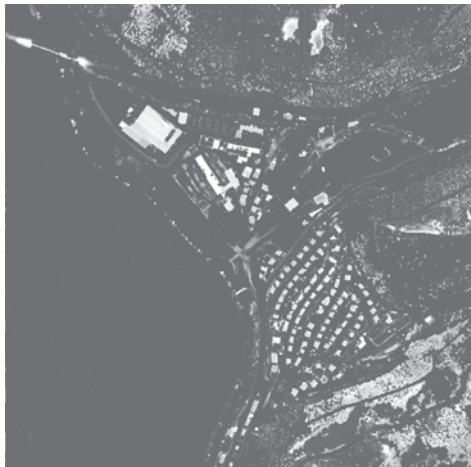




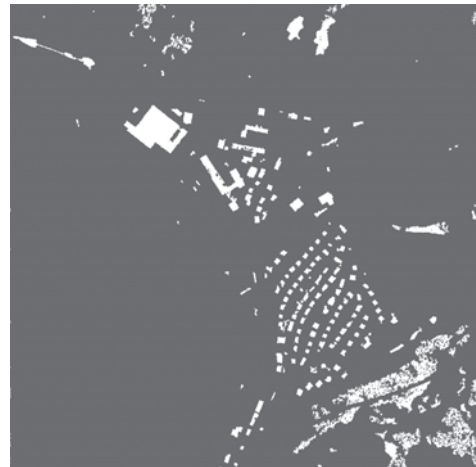
**Abb. 1:** Original-Laserscannerdaten Testgebiet 'Fridingen', Ausschnitt: ca. 1 km × 1 km (Höhen grauwert-kodiert).



**Abb. 2:** DGM mittels Filterung (Testgebiet 'Fridingen').



**Abb. 3:** Normalisiertes DOM (nDOM).



**Abb. 4:** Segmentierte 3D-Objekte.

### 2.3 Klassifizierung der 3D-Objekte

Der Klassifizierungsprozess beginnt mit der Extraktion objektspezifischer Merkmale innerhalb der segmentierten 3D-Objekte. Als Merkmale dienen Parameter wie *Höhentextur*, *Objektrandgradienten*, *Form* oder *First-/Last-Pulse-Differenz* (STEINLE & VÖGTLE 2001).

Geht man – wie in dem hier vorgestellten Ansatz – davon aus, dass sich Gebäude durch ebene Flächen approximieren lassen

(Kap. 3.3), kommen somit als Parameter für die *Höhentextur*, die wesentlich zur Unterscheidung zwischen Gebäude und Vegetation beitragen soll, nur solche in Betracht, welche die Höhenabweichungen gegenüber beliebig orientierten Ebenen im Raum erfassen. Hierzu haben sich der Laplace-Operator (z. B. MAAS 1999) bzw. die lokale Krümmung (STEINLE & VÖGTLE 2001) bewährt. Die prozentuale Anzahl signifikanter *Objektrand-Gradienten* dient in erster Linie der Differenzierung zwischen den Gebäuden

bzw. Vegetationsobjekten einerseits, und den Geländeobjekten andererseits. Ebenso besitzen Gebäude i.a. eine spezifische Charakteristik bzgl. ihrer *Form*, z. B. die Parallelität bzw. Rechtwinkligkeit ihrer längsten Seiten. Schließlich zeichnen sich Vegetationsobjekte i.a. durch eine signifikante Differenz zwischen den *First- und Last-Pulse-Höhenwerten* aus. Beispielhaft sind die Höhentextur/Objektrandgradienten (Abb. 5) und die Objektkonturlinien (Abb. 6) zur Bestimmung der Form dargestellt.



**Abb. 5:** Höhentextur (lokale Krümmung).



**Abb. 6:** Objektkonturen (helle Umrandungen) zur Formbestimmung.

Die Arbeiten von HUG (1997) sowie eigene Untersuchungen zeigen, dass jedoch erst das Zusammenspiel aller Parameter in einem gemeinsamen Klassifizierungsprozess zu befriedigenden Ergebnissen führt. Da die meisten der oben erwähnten objektspezifischen Parameter nicht normal verteilt sind, wurde eine Klassifizierung auf der Basis der *fuzzy logic* (z. B. TILLI 1993) favorisiert. Dazu müssen für jeden Parameter Zugehörigkeitsfunktionen der entsprechenden Klassen aufgestellt werden (Fuzzyfizierung).

Die Untersuchungen mit drei völlig unterschiedlichen Testgebieten (Fridingen: extreme Topographie (z. B. Felsformationen, Dämme), Lissabon: Innenbereich Großstadt, Lindau: ländliches Gebiet, ausgeprägte Waldgebiete) ergaben, dass die Werte der gewählten Bewertungsfunktionen stabil und somit weitgehend unabhängig von den lokalen Gegebenheiten sind. Für jede Klasse müssen diese Einzelbewertungen nun verknüpft werden, um zu einer Gesamtbewertung zu kommen (Inferenz-Prozess). Dazu werden in diesem Projekt zwei unterschiedliche Entscheidungsstrukturen (Inferenzschemata) untersucht, die *gewichtete Summe* und ein *System logischer Operatoren*, da sich andere untersuchte Schemata – wie z. B. der Maximum-Operator aufgrund der mangelnden Berücksichtigung der restlichen Be-



**Abb. 7:** Klassifizierungsergebnis mittels *fuzzy logic* (dunkelgrau: Gebäude, hellgrau: Vegetation, weiß: Gelände).

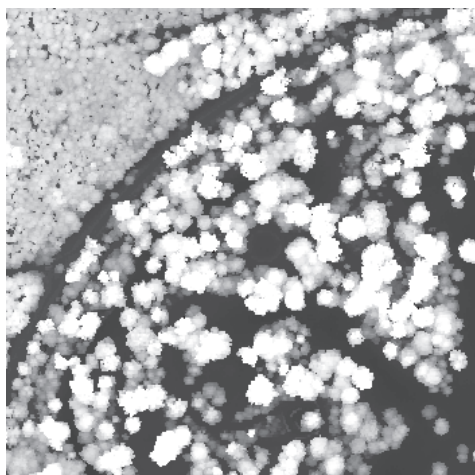
wertungen – als nicht geeignet erwiesen haben. Ein erstes Ergebnis einer Klassifizierung mittels gewichteter Addition ist in Abb. 7 wiedergegeben. Die Klassifizierungsrate liegt hier bei ca. 92%. Die Ergebnisse des Systems logischer Operatoren werden zurzeit noch eingehender untersucht.

### 3 Modellierung der Vegetationsobjekte

Die klassifizierten 3D-Objekte dienen nun als Hypothese für die entsprechende Klasse. Diese Objekte werden dem klassenspezifischen Modellierungsprozess zugeführt und dort erst bestätigt bzw. verworfen. Wie bereits erwähnt, soll hier ausschließlich auf die geometrische Modellierung der Vegetationsobjekte eingegangen werden.

#### 3.1 Segmentation in einzelne Vegetationsobjekte

Da eng zusammenstehende Bäume, deren Kronen sich teilweise durchdringen, zumeist als ein einziges, größeres Vegetationsobjekt segmentiert werden, muss – je nach Anwendung – ggf. noch ein Verarbeitungsschritt zur Separierung in einzelne Baumobjekte implementiert werden. Hierzu werden zurzeit unterschiedliche Verfahren untersucht,



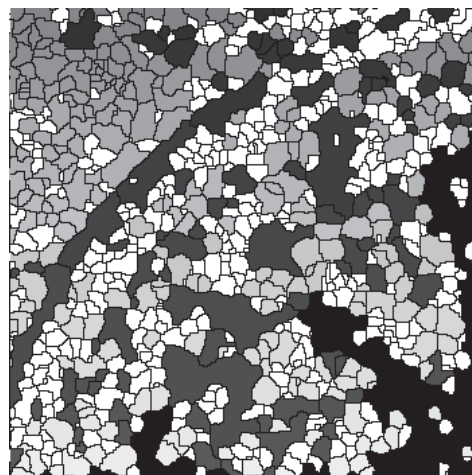
**Abb. 8:** Original-Laserscandaten (first pulse), Ausschnitt Testgebiet Karlsruhe (350 m × 350 m).

z. B. der in der Literatur mehrfach vorgeschlagene Wasserscheidenalgorithmus (z. B. STRAUB 2003).

Abb. 8 zeigt einen Ausschnitt der Originalhöhendaten des Testgebietes Karlsruhe, während in Abb. 9 beispielhaft die einzelnen Baumsegmente dargestellt sind, wie sie mittels Wasserscheidenalgorithmus extrahiert wurden. Die Qualität dieser Segmentation wird z. Zt. in einer Studie untersucht. Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Vergleich mit den Ergebnissen einer visuellen Interpretation zur Abgrenzung der Kronen eine befriedigende Übereinstimmung (ca. 80–85%) zeigt, während der Vergleich der Anzahl der Bäume mit den geodätisch eingemessenen Positionen nur ca. 50–60% liefert. Der Umfang der untersuchten Waldflächen und Baumgruppen ist jedoch noch zu gering, um gesicherte Resultate vorlegen zu können.

#### 3.2 Geometrische Modellierung der Vegetationsobjekte

Die als Hypothese für die Klasse *Vegetation* gefundenen und separierten 3D-Objekte werden nun geometrisch modelliert. Gelingt dies innerhalb der nutzerdefinierten zulässigen Abweichungen, wird das betrachtete Objekt als *Vegetation* bestätigt. Die geometrische



**Abb. 9:** Segmentierung der Einzelbäume mittels Wasserscheidenalgorithmus, Ausschnitt Testgebiet Karlsruhe (350 m × 350 m).

rische Modellierung dieser Einzelobjekte basiert auf dem Ansatz von POLLOCK (1996), der Bäume durch generalisierte Rotationsellipsoide approximiert:

$$\frac{z^n}{a^n} + \frac{(x^2 + y^2)^{\frac{n}{2}}}{b^n} = 1 \quad (2)$$

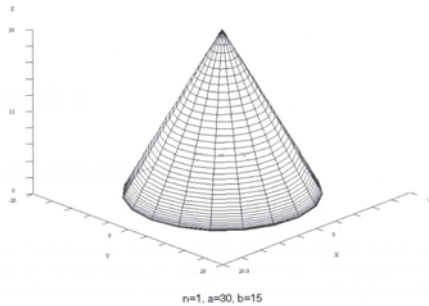
$a, b$  Ellipsoidhalbmesser

Dabei bestimmt die Potenz  $n$ , die nicht ganzzahlig sein muss, die Form des Ellipsoides (Abb. 10). Dieses wird nun in einem *best fit* an die Laserdaten angepasst, d. h. die innerhalb einer Segmentfläche liegenden 3D-Punkte dienen als Beobachtungen in einer Ausgleichung der Ellipsoidparameter  $a$ ,  $b$  und  $n$ , wozu Gl. (2) linearisiert werden muss. Während sich Näherungswerte für  $a$  und  $b$  relativ leicht aus den Laserdaten und der Segmentierung ableiten lassen, ist dies für  $n$  schwieriger. Es zeigt sich jedoch, dass mit einem einheitlichen Näherungswert von  $n_0 = 1.5$  für alle Kronenformen ein ausrei-

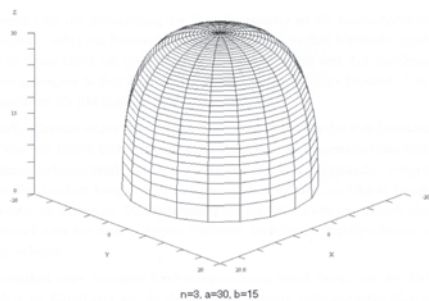
chend genauer Startwert zur Verfügung steht, um die Konvergenz der Ausgleichung zu gewährleisten. Unsere Untersuchungen haben jedoch ergeben, dass bei Verwendung der Original-Laserhöhenwerte der horizontale Ellipsoidhalbmesser  $b$  (Kronenhalbmesser) deutlich zu groß geschätzt wird, da die Messwerte an den Kronenflanken zahlenmäßig unterrepräsentiert sind (BARTH 2000).

Erst durch entsprechende Gewichtung bzw. nach Glättung der Höhenwerte mittels Filterung (z. B. Median-Filterung) werden geeignete Anpassungen (*best fit*) erzielt (Abb. 11).

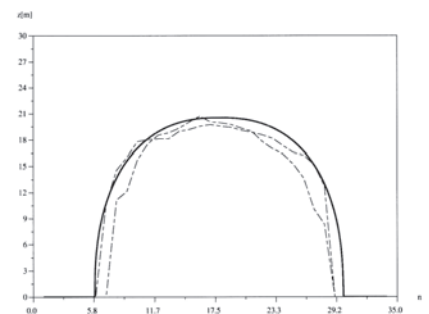
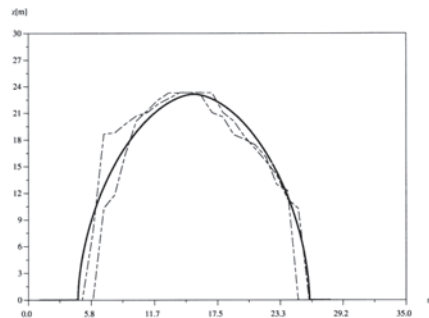
Ein grundsätzliches Problem ergibt sich bei diesem Ansatz jedoch dadurch, dass bei flugzeuggetragenem Laserscanning nur die obere Hälfte der Baumkrone (Lichtkrone) beobachtet werden kann. Bei der Schätzung der Ellipsoidparameter im Rahmen der Ausgleichung wird zumeist der Halbmesser in Richtung der Rotationsachse signifikant zu groß geschätzt, wodurch das Ellipsoid oft



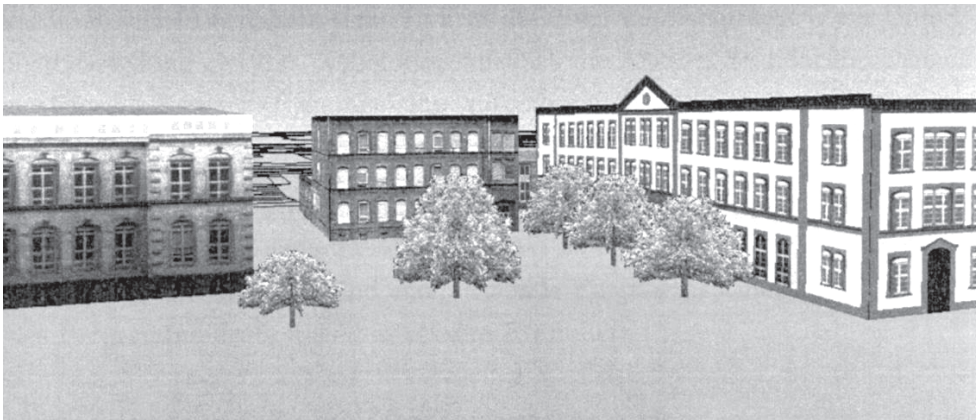
**Abb 10a:** Form generalisierter Rotationsellipsoide für  $n = 1$  (aus: MAYR et al. 1999).



**Abb. 10b:** Form generalisierter Rotationsellipsoide für  $n = 3$  (aus: MAYR et al. 1999).



**Abb. 11:** Ausgleichende generalisierte Rotationsellipsoide (durchgezogene Linien) und repräsentative Baumkronen-Profile (gestrichelte Linien).



**Abb. 12:** Visualisierung der Baumobjekte aufgrund der ermittelten Baumhöhe und Kronendurchmesser (Ausschnitt des Campus-Informationssystems CISKA, Univ. Karlsruhe).

bis unter die Erdoberfläche reicht und der Kronendurchmesser leicht verfälscht wird.

### 3.3 Visualisierung der 3D-Objekte

Zur Visualisierung werden nun die so bestimmten Baumhöhen und Kronendurchmesser zur Bildung eines entsprechenden Körpers verwendet, der dann mit einer Blatt-Textur überlagert wird. Als Anwendung kommen neben der Visualisierung von Stadtmodellen (z. B. LANDES 1999) insbesondere forstwirtschaftliche (Bestand, Baumhöhen, Biomasse etc.) und planerische Aufgaben (Grünordnungspläne, Baumkataster etc.) in Betracht.

Die Gebäude, deren 3D-Modellierung auf einem generischen Ansatz zur Approximation mittels Verknüpfung ebener Flächen basiert (z. B. VÖGTLE & STEINLE 2003), lassen sich ebenfalls durch Texturmapping realitätsnah darstellen. Als Beispiel sei ein Ausschnitt des Campus-Informationssystems CISKA (Univ. Karlsruhe) mit den entsprechend detektierten, modellierten und texturierten Vegetations- und Gebäudeobjekten wiedergegeben (Abb. 12).

## 4 Ausblick

Obwohl die vorgestellten Verfahren zur Detektion, Klassifizierung und Modellierung von 3D-Objekten aus Laserscannerdaten

bereits gute Ergebnisse zeigen, ist sicherlich noch Verbesserungspotential vorhanden. Zur Optimierung der Klassifizierungsergebnisse lassen sich einerseits geeignetere Formparameter – speziell zur trennschärferen Unterscheidung dieser Objekte – entwickeln, andererseits können zukünftig auch die Intensitätswerte einbezogen werden, wie sie moderne Laserscanner liefern. Auch der noch recht einfach strukturierte Inferenzprozess kann zur Steigerung der Klassifizierungsrate durch stärkere Integration von Expertenwissen verfeinert werden. Alternativ zur Fuzzy-Logic-Methode sollen zukünftig auch statistische Klassifizierungsverfahren auf ihre Eignung für diese Anwendung untersucht werden.

Bei der Modellierung der Vegetation scheint die Approximation mittels generalisierter Rotationsellipsoide für die Ableitung numerischer Größen (z. B. Biomasse, Stammdurchmesser etc.) zu grob und zu aufwändig, zumal die oberen und unteren Kronenhälften (Licht- und Schattenkrone) in aller Regel nicht symmetrisch sind. Generische Verfahren, die ein artenspezifisches Wachstum simulieren, könnten hier versuchsweise getestet werden.

## 5 Dank

Ein Großteil dieser Forschungsarbeiten entstand im Rahmen des Sonderforschungsbe-

reiches SFB 461 „Starkbeben“ der DFG. Weiterhin sei der Fa. TopoSys (Ravensburg) für die Bereitstellung von Laserscannerdaten gedankt.

## 6 Literatur

- ACKERMANN, F., 1999: Airborne Laser Scanning – Present Status and future expectations. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **1999** (54): 64–67.
- AXELSSON, P., 1999: Processing of laser scanner data – algorithms and applications. – *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **1999** (54): 138–147.
- BARTH, H.P., 2000: 3D-Modellierung von Vegetation und deren Visualisierung in virtuellen Stadtmodellen. – Unveröff. Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Universität Karlsruhe, 80 S.
- BRENNER, C. & HAALA, N., 2000: Erfassung von 3D Stadtmodellen. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG)* **2000** (2): 109–118.
- VON HANSEN, W. & VÖGTLE, T., 1999: Extraktion der Geländeoberfläche aus flugzeuggetragenen Laserscanner-Aufnahmen. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG)* **1999** (4): 229–236.
- HUG, C., 1997: Extracting Artificial Surface Objects from Airborne Laser Scanner Data. – In: *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)*, Monte Verita. – pp. 203–212, Birkhäuser Verlag, Basel.
- LANDES, S., 1999: Funktionalität des internetbasierten 3D-CampusInformationssystems der Universität Karlsruhe (CISKA). – *Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 513*, München.
- MAAS, H.-G., 1999: The potential of height texture measures for the segmentation of airborne laserscanner data. – *Fourth International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition/21st Canadian Symposium on Remote Sensing*, Ottawa, Ontario, Canada, 21–24 June 1999.
- MAYR, W., MAYER, H., BACHER, U. & EBNER, H., 1999: Automatic Extraction of Trees from Aerial Imagery. – In: FÖRSTNER, W., LIEDTKE, C.-E. & BÜCKNER, J. (eds.), „SMATI 99“. – pp. 155–166, München.
- POLLOCK, R., 1996: The Automatic Recognition of Individual Trees in Aerial Images of Forests Based on a Synthetic Tree Crown Image Model. – PhD Thesis, Faculty of Computer Science, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- SCHIEWE, J., 2001: Ein regionenbasiertes Verfahren zur Extraktion der Geländeoberfläche aus Digitalen Oberflächen-Modellen. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG)*, **2001** (2): 81–90.
- SITHOLE, G. & VOSSELMAN, G., 2003: Comparison of Filtering Algorithms. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **XXXIV** (3/W13), Oct. 2003: 71–78, Dresden.
- STEINLE, E. & VÖGTLE, T., 2001: Automated extraction and reconstruction of buildings in laserscanning data for disaster management. – In: BALTSAVIAS, E. et al. (eds.), *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III)*. – pp. 309–318, Swets & Zeitlinger, Lisse, The Netherlands. ISBN 90 5809 252 6.
- STRAUB, B., 2003: A Top-Down Operator for the Automatic Extraction of Trees – Concept and Performance Evaluation. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **XXXIV** (3/W13), Oct. 2003: 34–39, Dresden.
- TILLI, T., 1993: Mustererkennung mit Fuzzy-Logik. – 336 S., Franzis Verlag, München.
- VÖGTLE, T. & STEINLE, E., 2000: 3D-Modelling of Buildings using Laser Scanning and Spectral Information. – *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Amsterdam, The Netherlands, **XXXII** (B3): 927–934.
- VÖGTLE, T. & STEINLE, E., 2003: On the Quality of Object Classification and Automated Building Modelling Based on Laserscanning Data. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **XXXIV** (3/W13), Oct. 2003: 149–155, Dresden.
- WEHR, A. & LOHR, U., 1999: Airborne laser scanning – an introduction and overview. – *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **1999** (54): 68–82.

### Anschrift der Autoren:

Dr.-Ing. THOMAS VÖGTLE  
 Dipl.-Ing. EBERHARD STEINLE  
 Universität Karlsruhe, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung  
 Englerstr. 7, D-76128 Karlsruhe  
 voegtle, steinle@ipf.uni-karlsruhe.de

Manuskript eingereicht: Februar 2004  
 Angenommen: April 2004

# Transformation of Dynamic Systems Describing Dynamic Objects

STANISLAV N. YASHKIN, MOSCOW

**Keywords:** geoinformatics, space geodesy, transformations of Cartesian coordinate systems

**Summary:** Transformations of Cartesian coordinate systems are considered in order to use them for geodetic tyings of dynamic objects. A definition of geodetic monitoring of dynamic objects is given. The main attention is devoted to continuous rotations and instantaneous turns. Direct and inverse algorithms of transformations from local to Greenwich and inertial systems are considered.

**Zusammenfassung:** Transformation dynamischer Systeme zur Beschreibung dynamischer Objekte. Betrachtungen zur Transformation Cartesischer Koordinatensysteme für die Berechnung geodätischer Objekte. Eine Definition zur geodätischen Erfassung dynamischer Objekte wird dargestellt. Schwerpunkte der Betrachtungen sind die kontinuierliche Rotation und momentane Drehungen. Betrachtet werden direkte und inverse Algorithmen zur Transformation von lokalen Systemen ins Greenwich-System und inertielle Systeme.

## 1 Definition and statement of problems

Dynamic systems will be considered as rectangular (Cartesian) coordinate systems executing translational and rotary motions. The objects situated in these systems may themselves have translational and rotary motions.

Definition: Geodetic monitoring will be considered to consist in periodic observations of dynamic systems and objects, that ensure a preset accuracy  $\sigma_n$  within an interval  $[t_0, t]$  in the definition of the equations of motions of systems and objects.

In the present paper we will consider translational motions that are linear

$$\Delta \bar{r} = \Delta \bar{r}_0 + \Delta \dot{\bar{r}}_0(t - t_0) \quad (1)$$

or nonlinear

$$\Delta \bar{r} = \Delta \bar{r}_0 + \Delta \dot{\bar{r}}_0(t - t_0) + \frac{\Delta \ddot{\bar{r}}_0}{2}(t - t_0)^2, \quad (\Delta \ddot{\bar{r}}_0 = 0) \quad (2)$$

Notice that transformations of Cartesian, rectangular systems are, in case of translational motions, carried out by trivial parallel translation. As for the dynamics of the objects to be considered, the objects are generally to be represented by material points and hence, only a translational motion will be taken into account. Parallel translation and rotation of the system are carried out by means of the well-known equation [1]:

$$\bar{r} = \Delta \bar{r} + \mu \cdot \Pi \cdot \bar{R} \quad (3)$$

where  $\bar{r}$  and  $\bar{R}$  are radius vectors locating the objects in the new and old systems,  $\Delta \bar{r}$  is the radius vector of parallel translation of the old system to the new one, coefficient  $\mu$  is a scale factor,  $\Pi$  is a matrix of order 3 that consists of direction cosines, which may be constant or have a weak or strong dependence on time  $t$ . On the assumption that the scale factors of the old and new systems equal,  $\mu = 1$ .

Let us consider three cases:

1. In the old system  $\bar{R}$  is motionless, and matrix  $\Pi(t)$  and  $\Delta\bar{r}(t)$  are functions of time  $t$ ;
2. In the old system, with objects  $\bar{R}(t)$  moving, matrix  $\Pi$  is independent of time  $t$ , and we will suppose that  $\Delta\bar{r} = 0$ ;
3. In the old system, with objects  $\bar{R}(t)$  moving, the origin and orientation of the system are variables, i. e.  $\bar{R}(t)$ ,  $\Pi(t)$  and  $\Delta\bar{r}(t)$  are functions of time  $t$ .

In all cases, in addition to the transformations of the systems and objects, we have to transform their velocities and accelerations.

## 2 The First Case of Transformation

We take the first and second derivations with respect to  $t$  using equation (3) and taking into account the first case and equation (2):

$$\begin{aligned} \dot{\bar{r}} &= \Delta\dot{\bar{r}}_0 + \Delta\ddot{\bar{r}}_0(t - t_0) + \dot{\Pi}\bar{R}, \\ \ddot{\bar{r}} &= \Delta\ddot{\bar{r}}_0 + \ddot{\Pi}\bar{R}, \end{aligned} \tag{4}$$

where we suppose that changes of acceleration of the origin of system  $\bar{R}$  are absent. Taking into account that matrix  $\Pi$  can always be presented in exponential form [4], i. e.  $\Pi = e^C$ , where  $C$  is a skew-symmetric matrix of the direction cosines of the axis of rotation in system  $\bar{R}$  [1], we have

$$\begin{aligned} \bar{r} &= \Delta\bar{r} + e^C\bar{R}, \\ \dot{\bar{r}} &= \Delta\dot{\bar{r}}_0 + \Delta\ddot{\bar{r}}_0(t - t_0) + \dot{C} \cdot (\bar{r} - \Delta\bar{r}), \\ \ddot{\bar{r}} &= \Delta\ddot{\bar{r}}_0 + (\ddot{C} + \dot{C}^2) \cdot (\bar{r} - \Delta\bar{r}), \end{aligned} \tag{5}$$

from which we substituted the expression  $e^C\bar{R}$  using the first equation in (5).

Matrix  $C$  has the next form:

$$C = \begin{pmatrix} 0 & -c_3 & c_2 \\ c_3 & 0 & -c_1 \\ -c_2 & c_1 & 0 \end{pmatrix} \tag{6}$$

where  $c_1 = \frac{n_{32} - n_{23}}{2 \sin \delta}$ ,  $c_2 = \frac{n_{31} - n_{13}}{2 \sin \delta}$ ,  
and  $c_3 = \frac{n_{21} - n_{12}}{2 \sin \delta}$ . (7)

Let us coin the following terms:

$$\begin{aligned} c_1^0 &= (n_{32} - n_{23})/2, & c_2^0 &= (n_{31} - n_{13})/2, \\ c_3^0 &= (n_{21} - n_{12})/2, \end{aligned} \tag{8}$$

where  $n_{ij}$  are non-diagonal elements of matrix  $\Pi$ .

Now, let us return to skew-symmetric matrix  $C$ , which will be to get the next form bearing in mind (6)–(8):

$$C = \begin{pmatrix} 0 & -c_3^0 & c_2^0 \\ c_3^0 & 0 & -c_1^0 \\ -c_2^0 & c_1^0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sin \delta} = C^0/\sin \delta \tag{9}$$

Taking the derivative of expression (9) with respect to  $t$ , we have

$$\dot{C} = (\dot{C}^0/\sin \delta - C \cdot \cos \delta \cdot \dot{\delta})/\sin \delta \tag{10}$$

The first summand of the expression (10) determines the axis of rotation, changing its position in space. A turn around this axis is carried out by means of an instantaneous turn, i. e. angle  $\delta$  in the first summand does not depends on time  $t$ . From (7) and (8) it is easy to see that motion and fixation of the axis of rotation provides non-diagonal elements of matrix  $\Pi$ .

But as the instantaneous turn of angle  $\delta$  will look like this [2]

$$\delta = \arccos \frac{n_{11} + n_{22} + n_{33} - 1}{2} \tag{11}$$

the value of the angle of turn  $\delta$  is defined by means of diagonal elements of matrix  $\Pi$ . Note that the second summand in (10) carries out the turn through an infinitesimal angle  $d\delta$ , so we can interpret these expressions as projections of the instantaneous rate of rotation, and if parameter  $t$  is time, the second summand in (10) given above are projections of the angular rate of rotation, i. e.

$$c_n c t g \delta \cdot d\delta = \omega_n \tag{12}$$

and  $c_n c t g \delta \cdot d\delta$  are projections of the angular rate  $\bar{\omega}$  on axes Ox, Oy and Oz [3].



Therefore let us rewrite the second summand (9) as [2]

$$\dot{C}_2 = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_Z & \omega_Y \\ \omega_Z & 0 & -\omega_X \\ -\omega_Y & \omega_X & 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

The second derivative from expression (10) with respect to  $t$  will look like this

$$\ddot{C} = \frac{d}{dt}(\dot{C}^0/\sin^2\delta - \dot{C}_2) \quad (14)$$

Differentiated with respect to time  $t$  of (14) we can get in explicit form the expression for  $\ddot{C}$ .

### 3 The Second Case of Transformation

This case describes the transformation of fixed systems in which objects are in motion. Let us address some specific problems. Let an object  $M$  be in motion relative to the Cartesian system of coordinates called “local” [3]. The local system is given in the following manner: The origin of system is located at point  $P$ , which is motionless in relation to the terrestrial surface. Axis  $PZ$  is directed at the nadir point, axis  $PX$  is directed towards the North Pole as a tangent to the meridian, and axis  $PY$  is directed to a point complementing the right-handed system. In the local system described above, let us give the object  $M$  mentioned above a radius vector  $\vec{R}_l(X_l, Y_l, Z_l)$ , a velocity  $\vec{R}'_l(\dot{X}_l, \dot{Y}_l, \dot{Z}_l)$  and an acceleration  $\vec{R}''_l(\ddot{X}_l, \ddot{Y}_l, \ddot{Z}_l)$ . The orientation of the local system at the basic point  $P$  is fixed in relation to the Greenwich system of coordinates.

Therefore, the coordinates, velocities and accelerations will be transformed to the Greenwich system by the same matrix  $\Pi_{El}$ , i. e.

$$\begin{aligned} \vec{R}_E &= \Pi_{El} \cdot \vec{R}_l, & \vec{R}'_E &= \Pi_{El} \cdot \vec{R}'_l, \\ \vec{R}''_E &= \Pi_{El} \cdot \vec{R}''_l. \end{aligned} \quad (15)$$

A notation for the generalized column vector of order 9 is coined by

$$\bar{Q} = (X, Y, Z, \dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}, \ddot{X}, \ddot{Y}, \ddot{Z})^T \quad (16)$$

with the appropriate indices ( $E$ ) or ( $l$ ) for the Greenwich and local systems. Above the generalized matrix  $\Pi_{El}$  we have

$$\Xi_{El} = \begin{pmatrix} \Pi_{El} & 0 & 0 \\ 0 & \Pi_{El} & 0 \\ 0 & 0 & \Pi_{El} \end{pmatrix} \quad (17)$$

where  $\Xi_{El}$  is a hypermatrix, and the 0s are zero matrices of order  $3 \times 3$ ; the content of a matrix  $\Pi_{El}$  will be considered below. For the transformation from the local to the Greenwich system we obtain the following expression

$$\bar{Q}_E = \Xi_{El} \cdot \bar{Q}_l \quad (18)$$

which will simultaneously transform coordinates, velocities and accelerations.

In Fig. 1,  $X_E O Y_E Z_E$  is the Greenwich system of coordinates with the origin at the centre of the mass of the Earth.

$X_l P Y_l Z_l$  is a local Cartesian coordinate system. The orientation of this system is determined above.

Let object  $M$  be given in the polar coordinate system:

- $\rho$  is the polar distance,
- $A$  is the azimuth of a direction  $PM$ ,
- $z$  is the zenith distance (or height  $h = 90 - z$ ) of a direction  $PM$

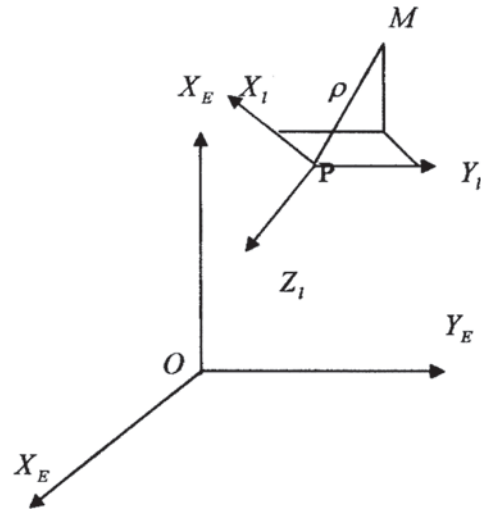


Fig. 1: Greenwich and local coordinate systems.

The dependence between the Cartesian and polar coordinates has the form:

$$\bar{R}_l = \begin{pmatrix} X_l \\ Y_l \\ Z_l \end{pmatrix} = \rho \begin{pmatrix} \cos(360 - A) \sin(180 - z) \\ \sin(360 - A) \sin(180 - z) \\ \cos(180 - z) \end{pmatrix} \tag{19}$$

There remains to be defined the expression for a matrix  $\Pi_{El}$ . Taking Euler's angles, which are standard in space geodesy and celestial mechanics, we have  $\Omega = 180 - \lambda$ ,  $i = 90 + \varphi$ , and  $\omega = 0$ , where  $\varphi$  and  $\lambda$  are the astronomical coordinates of point P. In this case, matrix  $\Pi$  will have the following form

$$\begin{aligned} \Pi_{El} &= \Pi_{OZ_E}(180 + \lambda) \cdot \Pi_{OY_E}(90 + \varphi) \cdot \Pi_{OZ_E}(0) \\ &= \begin{pmatrix} -\cos \lambda & \sin \lambda & 0 \\ -\sin \lambda & -\cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -\sin \varphi & 0 & -\cos \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \end{pmatrix} \end{aligned} \tag{20}$$

The final expression for matrix  $\Pi_{El}$  will be given below, but we suppose that expressions (20) are suitable for use, as in any environment (Mathcad, Mathematika, MatLab, Maple etc.) it is easier to write down the expression in this form, and multiplication of matrixes is performed automatically. Nevertheless, we have

$$\Pi_{El} = \begin{pmatrix} \sin \varphi \cos \lambda & \sin \lambda & \cos \varphi \cos \lambda \\ \sin \varphi \sin \lambda & -\cos \lambda & \cos \varphi \sin \lambda \\ \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \end{pmatrix} \tag{21}$$

The transformations on the basis of astronomical coordinates will result in low accuracy, but such tying is independent. Where a high accuracy of tying is essential, then the coordinates of point P should be known in the national reference frame system (CK-42 etc.) or in one determined in the satellite Greenwich system (WGS-84 or П3-90 etc.). The connection between different reference systems is given by means of known equations of rotation and parallel translation of

coordinate systems and the scale factor. The main value of such an equation (for example (3)) is represented by the values of numerical constants that are included in this equation.

Transition from the local geodetic into the Greenwich system of coordinates, velocities and accelerations will be executed on the basis of eq. (18), but it is necessary to formally replace astronomical coordinates  $\varphi$  and  $\lambda$  by the geodetic ones B and L in a matrix  $\Pi_{El}$  with expressions (20) or (21).

#### 4 The Third Case of Transformation

Let us consider the third case, in which the coordinates of the points and the origin of a local system are variable. Suppose they are changed continuously or instantaneously. We take the first and second derivatives with respect to  $t$  of equation (3), taking (2) into account:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{r}} &= \Delta \dot{\vec{r}}_0 + \Delta \ddot{\vec{r}}_0(t - t) + \dot{\Pi} \bar{R} + \Pi \dot{\bar{R}} \\ \ddot{\vec{r}} &= \Delta \ddot{\vec{r}}_0 + \ddot{\Pi} \bar{R} + 2 \dot{\Pi} \dot{\bar{R}} + \Pi \ddot{\bar{R}} \end{aligned} \tag{22}$$

As shown in [3], the equations for instantaneous and continuous rotations are invariable. Below we will consider the more general case of continuous rotations. By equation (16) above we have introduced a generalized column vector of order 9- $\bar{Q}_{El}$ , consisting of coordinates, velocities and accelerations. As for the generalized matrix of transformation, it has the same order (9 on 9), but  $H_{El}$  differs from a matrix  $\Xi_{El}$  by its contents.

The hypermatrix  $\Pi$  of this case will look like this:

$$H_{El} = \begin{pmatrix} \Pi_{El} & 0 & 0 \\ \dot{\Pi}_{El} & \Pi_{El} & 0 \\ \ddot{\Pi}_{El} & 2 \dot{\Pi}_{El} & \Pi_{El} \end{pmatrix} \tag{23}$$

where  $\Pi_{El}$  has the form of (20) or (21), and there are zero matrices of order 3 on 3. As to the derivative with respect to  $t$  from a matrix  $\Pi_{El}$ , we shall designate the rotation around an axis OZ by means of an index 3,

and around an axis OY by means of an index 2. We have

$$\begin{aligned} \dot{\Pi} &= \dot{\Pi}_3 \Pi_2 + \Pi_3 \dot{\Pi}_2, \\ \ddot{\Pi} &= \ddot{\Pi}_3 \Pi_2 + 2 \dot{\Pi}_3 \dot{\Pi}_2 + \Pi_3 \ddot{\Pi}_2, \end{aligned} \tag{24}$$

in which, based on (20), we obtain the derivatives by means of the differentiation with respect to  $t$  of the trigonometrical functions of sine and cosine. For example, the expression for  $\dot{\Pi}$  can be written as

$$\begin{aligned} \dot{\Pi} &= \begin{pmatrix} \sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ -\cos \lambda & \sin \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \Pi_2 \cdot \dot{\lambda} + \Pi_3 \\ &\cdot \begin{pmatrix} -\cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 0 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & -\cos \varphi \end{pmatrix} \cdot \dot{\varphi} \end{aligned} \tag{25}$$

where  $\Pi_2(\varphi)$  and  $\Pi_3(\lambda)$  are given by equation (20) in an obvious form. Similarly for  $\ddot{\Pi}$  we have an expression of the form

$$\begin{aligned} \ddot{\Pi} &= \begin{pmatrix} \cos \lambda & -\sin \lambda & 0 \\ \sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \Pi_2 \cdot \ddot{\lambda} + 2 \dot{\Pi}_3 \dot{\Pi}_2 \\ &\cdot \dot{\lambda} \cdot \dot{\varphi} + \Pi_3 \cdot \begin{pmatrix} \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \\ 0 & 0 & 0 \\ -\cos \varphi & 0 & \sin \varphi \end{pmatrix} \cdot \ddot{\varphi} \end{aligned} \tag{26}$$

where  $\dot{\Pi}_3(\lambda)$  and  $\dot{\Pi}_2(\varphi)$  are available from equation (25) in an obvious form.

As to the expressions for  $\dot{\lambda}$ ,  $\dot{\varphi}$ ,  $\ddot{\lambda}u\dot{\varphi}$ , it is necessary to know the dependence of  $\lambda u\varphi$  on time  $t$ . The linear dependence (according to (2))

$$\begin{pmatrix} \lambda \\ \varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_0 \\ \varphi_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_0 \\ e_0 \end{pmatrix} (t - t_0)$$

yields the expressions  $\dot{\lambda} = a_0 u \dot{\varphi} = e_0$  and  $\ddot{\lambda} = 0 u \ddot{\varphi} = 0$ .

For a nonlinear dependence, the equation will be similar to expressions in (2). Final transformations will look like this:

$$\bar{Q}_E = \Delta Q_E + H_{E_l} \bar{Q}_l \tag{27}$$

where  $\bar{Q}$  is represented by expression (16),  $H_{E_l}$  is represented by matrix (23), and H is

represented by the equations (20), (21) and (24)–(26), i. e.

$$\Delta Q_E = \begin{pmatrix} \Delta \bar{r}_0 & \Delta \dot{\bar{r}}_0 & \Delta \ddot{\bar{r}}_0 \\ \Delta \dot{\bar{r}}_0 & \Delta \ddot{\bar{r}}_0 & 0 \\ \Delta \ddot{\bar{r}}_0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ (t - t_0) \\ \frac{(t - t_0)^2}{2!} \end{pmatrix} \tag{28}$$

where the first matrix in (28) has the order (3 on 9).

Thus, equations (18)–(28) solve, by classical methods of geodesy and astronomy, the problem of the geodetic tyings of mobile and motionless objects that are situated either on a terrestrial surface or in the atmosphere or in the near space, as well as that of transforming such objects to a terrestrial geodetic system of coordinates by means of the universal algorithm. The inverse transformation is carried out by means of the transposed matrices  $\Pi_{E_l}$ ,  $\dot{\Pi}_{E_l}$  and  $\ddot{\Pi}_{E_l}$  of matrix  $H_{E_l}$  (23), and we can replace the old coordinates with new ones.

### 5 Transformation of a Terrestrial System into an Inertial One

Finally, we will consider the following case. Let us suppose that GPS or GLONASS receivers are installed on the object M considered above, and that there is the possibility to receive coordinates of object M in a geodetic system (WGS-84 or П3-90). The measurements will be considered in a dynamic mode, and in this mode we carry out a precise registration of time  $t$ .

In this case we can determine coordinates, velocities and accelerations of object M, i. e.

$$\begin{aligned} X_{ME}, Y_{ME}, Z_{ME}, \dot{X}_{ME}, \dot{Y}_{ME}, \dot{Z}_{ME}, \\ \ddot{X}_{ME}, \ddot{Y}_{ME}, \ddot{Z}_{ME}. \end{aligned}$$

In this case there is no need to use the algorithms described above, as the coordinates of object M are received directly in the Greenwich geodetic system of coordinates. It is necessary, though, to consider a problem of transformation from the Greenwich geodetic system to an inertial system

of coordinates (ICRS). For object M, this connection will look like this [4]:

$$\bar{r}_{Mi} = (P \cdot S \cdot N \cdot \Pi)_{iE} \cdot \bar{R}_{ME}, \tag{29}$$

where  $P$  is the matrix of transition from instantaneous coordinates to average coordinates (accounting for the movement of poles in case of a terrestrial surface),  $S$  is the matrix which takes into account the rotation of the Earth (a matrix of sidereal time),  $N$  is the matrix of nutation, and  $\Pi$  is the matrix of precession. An obvious form of the matrices listed is present in [5] or in any textbook on space geodesy, spherical astronomy or astrometry. Let us introduce a designation

$$H_{iE} = (P \cdot S \cdot N \cdot M)_{iE} \tag{30}$$

Then, for expression (29) and accounting for (30), we take the first and second derivatives and thus obtain the following equations:

$$\begin{aligned} \bar{r}_{iM} &= H_{iE} \bar{R}_{EM}, \\ \dot{\bar{r}}_{iM} &= \dot{H}_{iE} \bar{R}_{EM} + H_{iE} \dot{\bar{R}}_{EM}, \\ \ddot{\bar{r}}_{iM} &= \ddot{H}_{iE} \bar{R}_{EM} + 2 \dot{H}_{iM} \dot{\bar{R}}_{EM} + H_{iE} \ddot{\bar{R}}_{EM}. \end{aligned} \tag{31}$$

In view of the above generalizations, transformations from the Greenwich system to an inertial system can be presented as

$$\bar{q}_{iM} = \Xi_{iE} \bar{Q}_{EM}, \tag{32}$$

where  $\bar{q}_{iM} = (x \ y \ z \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \ddot{x} \ \ddot{y} \ \ddot{z})_{iM}^T \bar{Q}_{EM}$  looks like (16), and the matrix  $\Xi_{iM}$  looks like matrix (23), i. e.

$$\Xi_{iE} = \begin{pmatrix} H & 0 & 0 \\ \dot{H} & H & 0 \\ \ddot{H} & 2\dot{H} & H \end{pmatrix}_{iE} \tag{33}$$

where  $\Xi_{iE}$  is the hypermatrix. Each element of this matrix in turn represents matrices of order 3 by 3.

Let us consider the structure of a matrix  $H_{iE}$ . All matrices (except  $S$ ) included as components of (30) depend only weakly on current time  $t$ . In fact, these changes do not exceed

- 1'' arcs per year for a matrix  $P$ ,
- 10'' arcs per year for a matrix  $N$ ,
- 1' arcs per year for a matrix  $M$ .

In geodetic and astronomical practice, these changes take into account intervals of time that considerably exceed one year; besides, they are also taken into account as instantaneous. As for matrix  $S$ , although it carries out a continuous rotation, it is taken into account as an instantaneous turn through a value of sidereal time  $s$ , in order to unify the transformation. It concerns the transformation of coordinates, i. e. the first row of hypermatrix  $\Xi_{iE}$ .

As to the transformation of velocities and accelerations we are compelled to carry out a continuous rotation, since the angular velocity of the rotation of the Earth enters the matrices of transformation in an obvious form. Supposing that only matrix  $S$  depends from time  $t$ , we have

$$\begin{aligned} \dot{H}_{iE} &= (P \dot{S} N M)_{iE} = (P S N M \dot{S} S^T)_{iE} \\ &= (H \Omega)_{iE}, \end{aligned} \tag{34}$$

where the matrix  $\Omega$  is a matrix of the Earth's angular velocity  $\bar{\omega}$ . As the axis of rotation of the Earth, both in inertial and Greenwich systems, actually coincides with axes  $oz$  and  $oZ$ , matrix  $\Omega$  looks like this:

$$\begin{aligned} \Omega_{iE} &\approx \begin{pmatrix} 0 & -\omega_z & 0 \\ \omega_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ \text{or} \\ \Omega_{iE} &= \begin{pmatrix} 0 & -\omega_Z & \Delta\omega_Y \\ \omega_Z & 0 & -\Delta\omega_X \\ -\Delta\omega_Y & \Delta\omega_X & 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \tag{35}$$

Similarly, for acceleration transformation we have

$$\ddot{H}_{iE} = H_{iE} \dot{\Omega}_{iE} \tag{36}$$

Accounting for (34) and (36), the hypermatrix  $\Xi_{iE}$  in expression (33) can be represented as

$$\Xi_{iE} = H_{iE} \begin{pmatrix} I & 0 & 0 \\ \Omega & I & 0 \\ \dot{\Omega} & 2\Omega & I \end{pmatrix}_{iE} \tag{37}$$

where  $I$  denote identity matrices of dimension 3 on 3, and matrices  $H_{iE}$ ,  $\Omega u \dot{\Omega}$  are of

the kind given above. Thus, transformation (32) in which the matrix  $\Xi_{iE}$  looks like (37), together with the equations (31)–(36), solves the problem of transformation of coordinates, velocities and accelerations from the Greenwich system into an inertial system.

If the equations of the inverse algorithm are used, it is enough to transpose separately each of the matrices making up the hypermatrix  $\Xi_{iE}$ .

It is of importance and of interest to obtain an estimation of the accuracy of the equations developed here.

## References

- [1] YASHKIN, S. N., 2003: Some Aspects of Transformation of Coordinates. – News of High School. Geodesy and Airsurveying, No. 2, Moscow.
- [2] CORN, G. A. & CORN, T. M., 1968: Mathematical Handbook for scientists and engineers. New York – San Francisco – Toronto – London – Sydney.
- [3] TORGE, W., 1989: Gravimetry. – Walter de Gruyter, Berlin – New York.
- [4] SEEBER, G., 1993: Satellite Geodesy. – Walter de Gruyter, Berlin – New York.
- [5] WINTNER, A., 1941: The Analytical Foundation of Celestial Mechanics. – New Jersey – London.

Address of the author:

Prof. Doc. Techn. Sc. STANISLAV N. YASHKIN  
Department of Astronomy and Space Geodesy,  
Moscow State University for Geodesy and Cartography (MIIGAiK)  
4, Gorochovsky Pereulok, Moscow 105064  
e-mail: snyashkin@rambler.ru  
or: lonsky@miigaik.ru

Manuskript eingereicht: Januar 2004  
Angenommen: März 2004



## GIS und Informations-Management im „Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology“

PETRA KÖHLER, Potsdam & CHRISTIANE LECHTENBÖRGER, Karlsruhe

**Keywords:** CEDIM, geographic information system, internet technology, standards, information infrastructure

**Zusammenfassung:** Zunächst wird das virtuelle „Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology“ (CEDIM) vorgestellt. Erstes Projekt der Einrichtung ist die Erstellung einer „Risikokarte Deutschland“, die Disziplinen übergreifend die Risiken verschiedener Natur- und technologischer Katastrophen bewertend darstellt.

Grundlage ist ein auf die Anforderungen der Problemstellung abgestimmtes Daten- und Informationsmanagement. Die Gewährleistung einer qualitativen Datenversorgung und die Abbildung komplexer Untersuchungen und Informationsflüsse durch geeignete Geo-Informationstechnologien sind Komponenten einer umfassenden Informationsinfrastruktur und ermöglichen interdisziplinäre Methodenentwicklung und den Austausch und die Weitergabe von Forschungsergebnissen.

**Summary:** *GIS and information management in CEDIM.* The virtual “Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology” (CEDIM) is introduced. The first project of the center is the development of a “Risk Map Germany” which will provide discipline-spanning estimation of the risks due to different natural or technological disasters.

Data and information management is subject to the scientific tasks. The provision of a high-quality data base and the mapping of complex questions and information flows by suitable geometrical solutions result in a comprehensive information infrastructure and allow interdisciplinary development of methods as well as exchange and transfer of scientific results.

---

### 1 Problemstellung

#### 1.1 Das Institut CEDIM

Das Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology wurde im Dezember 2002 als virtuelles Institut von Universität Karlsruhe (TH) und GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) gegründet. Es verknüpft Fachdisziplinen wie Geophysik, Ingenieur-, Wirtschaftswissenschaften, Meteorologie, Hydrologie und Geoinformatik. Ziel ist die Entwicklung und Bereitstellung von Methoden und Werkzeugen zur Analyse und Reduktion von Risiken durch Katastrophenereignisse (ZSCHAU et al. 2003).

Themenorientierte Projektgruppen konzentrieren sich auf folgende Gefährdungen:

- Erdbeben
- extreme Wetterereignisse, z. B. Stürme
- Hochwasser
- Weltraumwetter
- „Man-Made Hazards“.

Die Gruppe „Infrastrukturen“ betrachtet das Schadenpotenzial durch Ausfälle von Netzwerkinfrastrukturen. Alle Arbeitsgruppen werden in ihrer Arbeit durch die Gruppe „Datenmanagement und GIS“ unterstützt (LECHTENBÖRGER 2003).

## 1.2 Risikokarte Deutschland

Im Rahmen des ersten Projekts „Risikokarte Deutschland“ werden Methoden zur Darstellung einer generellen (v. a. monetären) Abschätzung der Risiken durch die o. g. Gefährdungen erarbeitet. Die Risiken sollen kombiniert und die daraus abgeleiteten Schadenpotenziale synthetisiert abgebildet werden.

Bestehende Methoden beteiligter Fachdisziplinen müssen modifiziert, neue Methoden entwickelt und harmonisiert werden. So werden zur Modellierung von Erdbeben- oder Hochwasserrisiken i.d.R. unterschiedliche Wiederholungsraten bzw. Eintrittswahrscheinlichkeiten auf Basis bestehender Informationen angesetzt. Die Gruppe „Man-Made Hazards“ kann demgegenüber nicht auf historische Zeitreihenanalysen zurückgreifen. Vielmehr sind Szenarien auf der Grundlage geschehener Ereignisse zu erarbeiten, z. B. der Terroranschläge in Madrid im März 2004. Auch unterscheiden sich räumliche Auflösung bzw. Maßstabsebenen der Modellierung von Hochwasserrisiken oder Risiken durch Starkwindereignisse (z. B. zentimeter- versus kilometergenaue Angaben).

## 2 Daten- und Informations-Management im CEDIM

Grundlage eines abgestimmten Ansatzes zur integrierten Risikobewertung mit gemeinsamem Ziel Risikokarte Deutschland muss zum einen ein gemeinsames und auf die Anforderungen der Arbeitsgruppen sowie externer Nutzer angepasstes Datenmanagement sein und zum anderen wechselseitige Information und Kommunikation zwischen den beteiligten Partnern.

### 2.1 Datenakquisition und -bereitstellung

Der Aufbau einer Datenbasis, die allen Wissenschaftlern gleichermaßen zur Verfügung steht und eine einheitliche Informations- und Bewertungsgrundlage bietet, ist Voraussetzung für eine vergleichende Risi-

koabschätzung. Zunächst und vor allen anderen werden umfassende Geobasisdaten (topographische Karten, Digitale Geländemodelle, Luft- und Satellitenbilder etc.) benötigt. Auch der Bedarf an Fachdaten ist erheblich: Hier sind u. a. Daten zu Landnutzung, Pegelständen, Gebäudecharakteristika sowie soziodemographische/-ökonomische Daten zu nennen, die zur Analyse mit den entsprechenden Geobasisdaten verknüpft werden.

Die CEDIM-Datenbasis umfasst derzeit im Wesentlichen folgende Daten:

- ATKIS: Basis-DLM ausgewählter Regionen
- Digitale Geländemodelle
- Landnutzungsdaten (CORINE)
- Gebäudedaten (Alter, Qualität etc.)
- Einwohner-, Kaufkraftdaten etc.

Lösungen auf der Basis von Geoinformationssystemen (GIS) und Internettechnologie sollen dazu dienen, interdisziplinären Datenzugriff und -austausch zu ermöglichen. Die zur Verfügung stehenden Daten werden zusammengeführt, harmonisiert und einheitlich aufbereitet. Sie werden über einen zentralen Geodatenservice bereitgestellt.

Ein erster Prototyp basiert auf dem Arc Internet Map Server (ArcIMS, Version 4.0.1) der Firma ESRI (Abb. 1). Er bietet den Web-basierten Zugang zur CEDIM-Datenbasis und erlaubt die Datenvisualisierung und ausgewählte GIS-Funktionalitäten wie Zooming, Panning, das Messen von Distanzen sowie die Durchführung einfacher Abfragen.

Der Dienst erlaubt es den Wissenschaftlern somit, sich einen Überblick über die Daten zu verschaffen und anhand der Darstellung am Bildschirm über deren Eignung für ihre spezifischen Zwecke zu entscheiden. Anschließend können sie heruntergeladen und im eigenen GIS, Modellierungs- oder Simulationswerkzeug genutzt werden.

In einem weiteren Schritt ist die Einbindung eines Metadaten-service geplant. Die Dokumentation von Daten und Informationen mittels Metadaten („Daten über Daten“) und deren Bereitstellung über einen



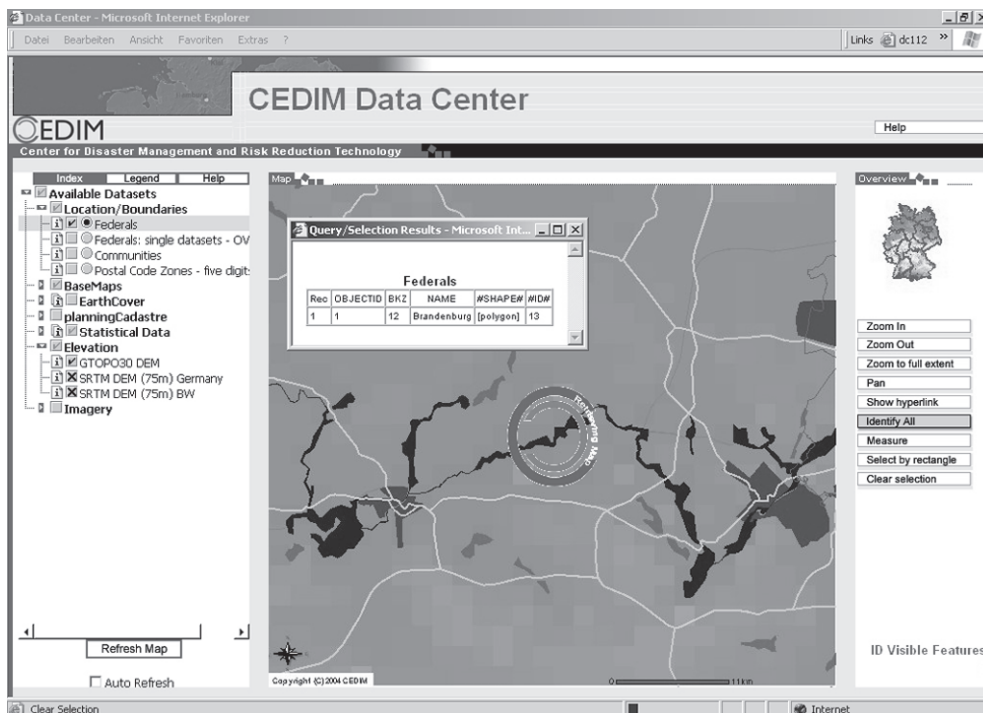


Abb. 1: Der CEDIM-Geodatenervice (Screenshot).

entsprechenden Dienst gestatten neben dem Überblick über vorliegende Bestände ein übergreifendes Datenretrieval, die benutzerdefinierte Recherche über diverse Suchkriterien (Raum-, Zeit- und Themenbezug). Die Erfassung der Metadaten wird nach Schemata gemäß dem Standard „ISO 19115 – Geographic information: Metadata“ erfolgen.

## 2.2 Nutzerverwaltung

Während auf Ausgangsdaten, vertrauliche Dokumente und Werkzeuge lediglich die Projektmitglieder Zugriff haben, sollen allgemeine Informationen sowie ausgewählte Ergebnisse auch Kooperationspartnern zur Verfügung stehen. Der Zugriff auf die Datenbasis erfolgt zurzeit über den Abgleich anfragender und registrierter IP-Adressen. So können bekannte und als berechtigt verzeichnete Nutzer erkannt und für einen vollen Zugriff des Datenservice zugelassen werden. Mit zunehmender Vielfältigkeit von

Lizenzierungsregelungen, Datensensibilität und Nutzern wird eine differenziertere Administration notwendig werden. Spezifische Zugriffsprofile müssen erstellt werden, die sicherstellen, dass z. B. Statistiken eines Versicherungsunternehmens nicht für Dritte abrufbar oder einsehbar sind, während die auf deren Basis erarbeiteten Informationsprodukte unabhängig davon zugänglich sind.

## 2.3 Projektplattform

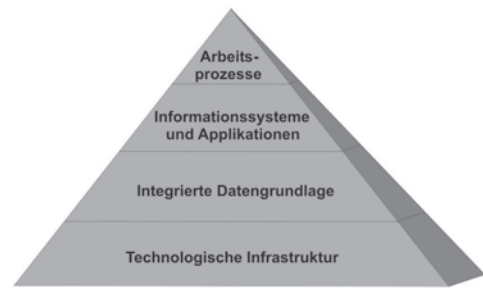
Eine Internetpräsentation ist erarbeitet worden, die mehrere Ziele verfolgt: Die zweisprachige (englisch, deutsch) Website (<http://www.cedim.de>) dient der Präsentation nach außen und vermittelt allgemeine Informationen über die Einrichtung CEDIM und deren Ziele. Dem CEDIM-Mitarbeiter werden über einen internen Bereich arbeitsrelevante Informationen, Dokumente, Arbeitsmaterialien etc. zur Verfügung gestellt, wobei eine integrierte Groupware als Informa-

tions- und Kommunikationswerkzeug dient und zur Vernetzung der Projektpartner beiträgt. Das modulare Werkzeug hält neben dem Dokumentenmanagement u. a. Funktionalitäten wie einen gemeinsamen Kalender, ein Diskussionsforum und einen Kontakt- und Email-Manager vor. Es handelt sich dabei um das Produkt PHProjekt, das auf einer WAMP-Konfiguration mit Windows als Betriebssystem, Apache als Webserver, MySQL als Datenbank und PHP als zu Grunde liegender Skriptsprache basiert.

### 3 Verwendung von Standards und Einbindung in übergeordnete Architekturen

Ziel des Projekts ist es, eine Sammlung von Gefährdungs- und Risikokarten zu erstellen und potenziellen Nutzern zur Verfügung zu stellen. Um dies für eine Vielzahl von Anwendern zu ermöglichen, sollen die Ergebnisse in unterschiedlichen Systemen genutzt werden können und damit hersteller- und plattformunabhängig handhabbar sein.

Geodateninfrastrukturen (GDI) als Rahmenwerke, die eine Verbesserung von Zugänglichkeit und Nutzbarkeit raumbezogener Daten und Informationen zum Ziel haben, bieten umfassende Potenziale, um die geforderte Offenheit zu erreichen. Dies erfolgt durch abgestimmte organisatorische und informationstechnologische Konzeptionen auf verschiedenen Ebenen (lokal, national, international) und durch die Unterstützung anerkannter Standards für Softwarearchitekturen, Daten- und Metadaten sowie Systemschnittstellen. Die Ausrichtung der Ansätze im CEDIM auf aktuelle Entwicklungen beim Aufbau von Geodateninfrastrukturen erfolgt primär durch die aktive Beteiligung der Projektgruppe „Datenmanagement und GIS“ an entsprechenden GDI-Initiativen. Konzepte, die dort erarbeitet werden, werden in CEDIM umgesetzt. So ist beispielsweise geplant, das „Brandenburgische Metadatenprofil“ auf der Basis des Standards ISO 19115, bei dessen Entwicklung das GFZ maßgeblich beteiligt war (KÖHLER et al. 2003), für die geplan-



**Abb. 2:** Informationsinfrastruktur zur Abbildung der Forschungsaufgabe Risikokarte im CEDIM (verändert nach FEMA 2001, S. 24).

te Metadatenkomponente des Geodatenservice zu nutzen (vgl. 2.2).

### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Die beschriebenen Komponenten des Daten- und Informationsmanagements im Rahmen des Centers for Disaster Management and Risk Reduction Technology fügen sich zusammen zu einer „Informationsinfrastruktur“ in Anlehnung an eine Konzeption der amerikanischen Federal Emergency Management Agency (FEMA 2001). Ausgehend von den Arbeitsprozessen der Anwender – hier: der Projektpartner sowie potenzieller Nutzer der Forschungsergebnisse – sind eine Daten- sowie eine technologische bzw. Systeminfrastruktur zu schaffen, welche die Entwicklung und Bereitstellung von Instrumentarien zur Unterstützung der jeweiligen Aufgaben ermöglicht. Abb. 2 zeigt das zu Grunde liegende Modell der CEDIM-Informationsinfrastruktur.

Vorgestellt wurden Konzeption wie auch erste Schritte zur Untersetzung der einzelnen Ebenen einer solchen Informationsinfrastruktur. Es bleibt festzuhalten, dass das Daten- und Informationsmanagement offen und erweiterbar gestaltet werden muss. Archivierungs- wie auch Disseminationsstrukturen müssen flexibel und sicher sein, sensible Daten sind vor unerlaubtem Zugriff zu schützen, externe Kooperationspartner in den Nutzerkreis aufzunehmen oder auch neue, erweiterte Funktionalitäten und Werkzeuge im Zuge des Auf- und Ausbaus des CEDIM zu schaffen. Die Bereitstellung

einer Informationsinfrastruktur endet demnach keineswegs mit gemeinsamem Daten- und Informationsmanagement und der Verwendung von GIS; vielmehr sind diese Prozesse iterativ angelegt und werden während der Erarbeitung der Risikokarte wie auch darüber hinaus fortgeführt werden.

## Literatur

- Federal Emergency Management Agency, 2001: Information Technology Architecture, Version 2.0 – The road to e-FEMA (Vol. 1), Washington, [http://www.fema.gov/pdf/library/it\\_vol1.pdf](http://www.fema.gov/pdf/library/it_vol1.pdf).
- KÖHLER, P., LOCHTER, F. & HÄNER, R., 2003: Entwicklung eines Brandenburgischen Metadatenprofils der ISO 19115 und dessen Umsetzung am Beispiel des Deutschen Forschungsnetzes Naturkatastrophen und des behördlichen Produktvertriebs. – *Umweltdatenbanken – Nutzung von Metadaten und Standards, UBA-Texte* **03** (54): 19–44.
- LECHTENBÖCKER, C., 2003: „Man-Made Hazards“. Terrorismusempfindliche Infrastrukturen werden untersucht. – *Homeland Security*, **03** (2): 21–22.
- ZSCHAU, J., EMMERMANN, R., STEMPNIEWSKI, L. & MERZ, B., 2003: Das Udenkbare denken. Beiträge der Wissenschaft zur Reduzierung von Naturkatastrophen. – *Homeland Security*, **03** (1): 29–32.

## Anschriften der Autoren:

Dipl.-Geogr. PETRA KÖHLER  
GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ)  
Daten- und Rechenzentrum  
Telegrafenberg, D-14473 Potsdam  
Tel.: 0331-288-1694  
e-mail: p.koehler@gfz-potsdam.de

Dr. rer. nat. CHRISTIANE LECHTENBÖCKER  
CEDIM – Geschäftsführung  
Universität Karlsruhe  
Gotthard-Franz-Str. 3, D-76131 Karlsruhe  
Tel.: 0721-608-3887  
e-mail: lechtenboerger@ifmb.uni-karlsruhe.de

Manuskript eingereicht: Februar 2004

Angenommen: April 2004



## Berichte

### **Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics (GOF-C-GOLD) Workshop**

2–4 March 2004, Jena

The second meeting of the GOF-C-GOLD Land Cover Implementation Team (LC-IT) was held at the Friedrich-Schiller-University Jena. GOF-C-GOLD is a coordinated international effort working to provide ongoing space-based and in-situ observations of the land surface for sustainable management of terrestrial resources and to obtain an accurate, reliable, quantitative understanding of the terrestrial carbon budget. Originally developed as a pilot project by the Committee on Earth Observation Satellites (CEOS) as part of their Integrated Global Observing Strategy (IGOS), GOF-C-GOLD is now a panel of the Global Terrestrial Observing System (GTOS).

Prof. CHRISTIANE SCHMULLIUS from the Friedrich-Schiller-University Jena was recently announced as co-chair of the GOF-C-GOLD LC-IT. Along with the introduction of C. SCHMULLIUS to the LC-IT, the European Space Agency (ESA) and GOF-C-GOLD established a new ESA Land Cover Project Office in Jena. The main purposes of the new ESA Land Cover Project Office are to strengthen the GOF-C-GOLD framework, to coordinate harmonization of land cover products, to promote and fulfill the GOF-C-GOLD land cover implementation plan, and to support ESA projects with respect to validation. The office is currently administered by KATHLEEN NEUMANN. In July 2004, MARTIN HEROLD will take over the office coordination for the next years. The ESA Land Cover Project Office is established for an initial three years with the prospect of continued operations due to its long-term implementation objectives. The LC-IT workshop was organized as “kick off” for the new office and focused on several general objectives:

1. Introduce and inaugurate the ESA Land Cover Project Office in Jena,
2. Review and evaluate previous accomplishments and implementation objectives of the GOF-C-GOLD LC-IT,
3. Discuss current and planned efforts in global cover mapping,
4. Develop action plans for GOF-C-GOLD land cover implementation.

The meeting was attended by members from the GOF-C-GOLD LC-IT, representatives from several national and international organizations (e.g. from FAO, CEOS, GTOS), space agencies (ESA, DLR, CNES, JAXA), and members of the scientific community and companies.

The first two days of the workshop were dedicated to review the Implementation Team and Regional Network activities, discuss ongoing and contributory projects and initiatives, and elaborate on the scientific perspective on the role of global land cover observations, in particular for land cover mapping and monitoring, and carbon modeling and accounting. Special attention was given to European contributions. Prof. JOHN TOWNSHEND (chair of GOF-C-GOLD) and Prof. DAVID SKOLE (co-chair of LC-IT) outlined the previous GOF-C-GOLD achievements and emphasized the role of GOF-C-GOLD as catalyst that brings together the variety of institutions and interest groups involved in the global Earth observation process. In numerous subsequent presentations updates of ongoing and future efforts in mapping, monitoring and modeling of land dynamics were presented and discussed following the objectives of the GOF-C-GOLD LC-IT. These objectives have been outlined in the first LC-IT meeting in Toulouse 2002:

1. Improved access to remote sensing data,
2. Improved pre-processing of remotely sensed data,
3. Evaluation and validation of global land cover products,

4. Improved global land cover products,
5. Land cover change monitoring,
6. Coupled remote sensing – in situ systems.

Significant contributions were made relating to objectives three, four, five and six in breakout group discussions on the third day of the workshop. The following breakout groups were formed during the workshop:

1. Land cover Classification and harmonization
2. Adequacy and advocacy of observing systems and data
3. Validation of land cover products

The breakout group discussions aimed to review prominent issues raised during the workshop, identify the role of GOFCC-GOLD towards resolving and responding to these issues, and define LC-IT actions and implementation steps for immediate steps and visionary goals that should be brought up in next meetings. More specifically, global land observations for mapping and modeling carbon dynamics are crucial and should be the priority of the LC-IT. This extends the previous activities that were strongly focused on forest cover and other specific land cover types, as well as, ecosystem assessment. The GOFCC-GOLD LC-IT has to strengthen the consideration of Earth observation requirements posed by international conventions. Particularly the adequacy and advocacy of current and future Earth observation efforts in supporting these requirements should be a central component in the implementation strategy. Furthermore, the GOFCC-GOLD LC-IT will take immediate action in specific areas:

1. The harmonization of global and regional land cover products in close cooperation with the FAO to apply the Land Cover Classification System (LCCS) as a translation language between and among the different maps and their thematic legends.
2. The validation of global Earth observation products. In cooperation with the CEOS Cal/Val group, the efforts will immediately focus on existing global land

cover maps, and in the near future on continuous field products.

3. The analysis land change requires coordinated international activities that will be initiated and guided through the LC-IT framework. Example are the proposed joint “US – European assessment of tropical forest change” discussed during the workshop and the Integrated Global Observations of the Land (IGOL) initiative, a proposed new theme of the IGOS Partnership.

More information about the ESA Land Cover Project Office, agenda and participants list of workshop can be found at: <http://www.gofcc-gold.uni-jena.de>.

Authors:

Prof. Dr. CHRISTIANE SCHMULLIUS,  
Dipl.-Geogr. KATHLEEN NEUMANN and  
Dr. MARTIN HEROLD

Department of Geoinformatics, Remote Sensing Section, Friedrich-Schiller-University, Löbdergraben 32, D-07743 Jena  
Tel.: +49-3641-948877,  
Fax: +49-3641-948882  
e-mail: c.schmullius@uni-jena.de  
kathleen.neumann@uni-jena.de  
martin@geog.ucsb.edu

## ISPRS Kongress Istanbul 2004

### Otto von Gruber-Preis

Dieser Preis wird auf Initiative von Prof. Dr. Ir. W. Schermerhorn aus der „Stiftung ITC Fonds“ zur Verfügung gestellt und in Erinnerung an Otto von Gruber verliehen. Er besteht aus einer Medaille und einem Geldpreis und wird einmal in vier Jahren dem Autor einer besonders wertvollen Veröffentlichung über Photogrammetrie, Photointerpretation oder Fernerkundung zuerkannt.

Den „Otto von Gruber-Preis“ 2004 erhielt Dr.-Ing. **STEPHAN HEUEL** Zürich, Schweiz, am 14. Juli 2004 anlässlich Eröffnungsveranstaltung durch John C. Trinder, ISPRS Präsident verliehen für seinen Anteil an der Erarbeitung eines einheitlichen An-

satzes für statistisches geometrisches Schließen für 2D und 3D Punkte, Geraden und Ebenen und Transformationen unter Berücksichtigung ihrer Unsicherheit. Geometrisches Schließen bedeutet dabei die Repräsentation und Manipulation der geometrischen Elemente zum Zwecke der geometrischen Beschreibung einer Szene.

Mit dieser Methode werden Punkte, Geraden und Ebenen im projektiven Raum repräsentiert, wobei projektive Elemente durch homogene Vektoren ausgedrückt werden. Dabei wird ein konsistenter Zusammenhang hergestellt zwischen den homogenen Koordinaten eines Vektors und seiner euklidischen Interpretation. Die Unsicherheit von homogenen Vektoren wird durch Kovarianzmatrizen repräsentiert, es wird also ein lineares Modell der Unsicherheiten angenommen. Damit wird gezeigt, dass unter wohldefinierten Bedingungen Kovarianzmatrizen ausreichen, um Unsicherheiten zu repräsentieren und Fehlerfortpflanzung zu betreiben.

Diese theoretischen Grundlagen sind eine wichtige Voraussetzung zur automatischen Erfassung von Gebäuden, Wegen und anderen Elementen aus Luftbildern.

### Schwidefsky-Medaille

Die „Schwidefsky-Medaille“ wurde 1986 geschaffen. Sie wird von der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF), e.V. gesponsort. Der Preis wird zur Erinnerung an Prof. Dr. rer. techn. Dr.-Ing. e.h. Kurt Schwidefsky, Ehrenmitglied der ISPRS, verliehen. Er besteht aus einer Plakette aus Porzellan und einer Urkunde. Ausgezeichnet werden Personen (nicht mehr als zwei bei einem ISPRS-Kongress), die signifikante Beiträge zur Photogrammetrie oder zur Fernerkundung geleistet haben, und zwar durch Publikationen als Autor oder Herausgeber oder in anderer Form.

Die „Schwidefsky-Medaille“ 2004 wurde verliehen an:

Dr. **EMMANUEL BALTSAVIAS**, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH).

Er erhält die Auszeichnung für seinen hervorragenden Beitrag als Herausgeber des „ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing“. Er hat das wissenschaftliche Niveau des Journal in bedeutendem Umfang angehoben, so dass es heute bezüglich seiner wissenschaftlichen Fachbeiträge zu den besten in der Welt gehört.

Dr. Baltsavias arbeitet mit hohem Zeit- und Energie-Aufwand an dieser Zeitschrift. Er hat ein effektives Review-System eingeführt, prüft selbst kritisch alle eingehenden Manuskripte und unterbreitet Vorschläge zu deren Verbesserung. Als profilierter Wissenschaftler regt er andere Wissenschaftler an, Beiträge zu speziellen Themen oder für Themenhefte zu verfassen. In seiner Funktion als Herausgeber arbeitet er weitgehend in der Tradition von Prof. Schwidefsky, der ja bekanntlich langjähriger Schriftleiter der deutschen Zeitschrift „Bildmessung und Luftbildwesen“ war.

Ergänzend soll hier hervorgehoben werden, dass es heute, im Zeitalter der vereinfachten Kommunikation mit dem Herausgeber, Dr. Baltsavias gelungen ist, die Kosten der Zeitschrift zu senken und den Umfang der Hefte deutlich zu vergrößern.

Als eine weitere spezielle Initiative wird hervorgehoben, dass er während der vergangenen vier Jahre entscheidend dazu beigetragen hat, den „Helava Preis“ zur Auszeichnung der „best journal papers“ zu organisieren und wirksam werden zu lassen.

Prof. Dr. **ZHILIN LI**, The Hong Kong Polytechnic University. Er wird mit der Schwidefsky-Medaille ausgezeichnet für seine signifikanten Beiträge zur Photogrammetrie, zur Fernerkundung und zu den geowissenschaftlichen Raum-Informationssystemen durch seine eigenen Forschungen, durch Publikationen und als Herausgeber.

Zhilin Li ist Professor für Geoinformatik (GIS, Kartographie, Photogrammetrie und Fernerkundung) im Dept. of Land Surveying and Geo-Informatics, The Hong Kong Polytechnic University. Seit 1990 war er Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der University of Newcastle upon Tyne (UK) und später an der Technischen Universität Berlin. 1994 verließ er Europa für einen

Lehrauftrag an der Curtin University of Technology (Australia). 1996 wurde er Assistant Professor an der Hong Kong Polytechnic University. Dort promovierte er und wurde im Mai 2003 zum Ordentlichen Professor berufen.

Seit 2000 ist er Chairman of ISPRS Working Group II/6 „Spatial Analysis and Visualization Systems“.

Prof. Zhilin Li hat mehr als 80 Aufsätze in wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht. Er ist beteiligt an der Herausgabe von 10 Büchern und hat 60 Konferenzbeiträge verfasst.

## Hochschulnachrichten

### Universität Hannover

Dipl.-Ing. **BERND-MICHAEL STRAUB** wurde am 5. 12. 2003 an der Universität Hannover zum Doktor-Ingenieur promoviert. Der Titel seiner Dissertation lautet „*Automatische Extraktion von Bäumen aus Fernerkundungsdaten*“. Vorsitzender der Promotionskommission war Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. GÜNTER SEEBER (Universität Hannover). Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. CHRISTIAN HEIPKE (Universität Hannover), Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. HELMUT MAYER (Universität der Bundeswehr München) und Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. MONIKA SESTER (Universität Hannover) haben die Dissertation als Referenten begutachtet.

Die Dissertation ist in der Reihe C der Deutschen Geodätischen Kommission (Nr. 572, 99 S.) und in der Reihe Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover (Nr. 249, 99 S.) erschienen.

#### Kurzfassung:

In der Dissertation wird ein neuer Ansatz zur automatischen Extraktion von Bäumen aus Fernerkundungsdaten – Luftbildern und Oberflächenmodellen – vorgeschlagen. Die wichtigsten Überlegungen, die zur Entwicklung des Ansatzes geführt haben, werden detailliert dargestellt. Dies gilt sowohl für das dem Ansatz zugrunde liegende Modell eines einzelnen Baumes, als auch für die darauf aufbauende Strategie zur Extraktion

von Merkmalen auf der Bildebene und deren Bewertung in der Phase der Hypothesenbildung. Darüber hinaus wird, basierend auf einem abstrakten Rahmen für die Objektextraktion aus Fernerkundungsdaten, die Extraktion einzelner Bäume in Verbindung mit anderen topographischen Objekten diskutiert. Ziel dieser Betrachtungen ist es, Möglichkeiten der Integration des hier dargestellten Ansatzes in ein System zur automatischen Interpretation von Fernerkundungsdaten aufzuzeigen.

Unter Extraktion ist hier die Erkennung einzelner Bäume im Sinne einer Identifikation und deren geometrische Rekonstruktion aus Fernerkundungsdaten zu verstehen. Die Grundlage für die Extraktion bildet ein Modell der Geometrie und der Radiometrie des Objektes Baum. Basierend auf diesem Modell werden einige wenige Merkmale identifiziert, die dann verwendet werden, um einzelne Bäume in den Bildern zu erkennen.

Die Grundidee der Strategie besteht darin, zunächst die oftmals komplexen Feinstrukturen der einzelnen Baumkronen durch eine lokal angepasste Tiefpassfilterung zu entfernen, um dann in einem zweiten Schritt die Baumkronen auf der Basis von Merkmalen der Grobstruktur zu identifizieren. Das Kernproblem dabei ist, dass die Größe der einzelnen Baumkronen und deren räumliche Anordnung entscheidenden Einfluss auf die Parameterwahl bei der Tiefpassfilterung haben, aber weder das eine



noch das andere als bekannt angenommen werden kann. Zur Lösung dieses Problems werden die Bilder nach einer Transformation im linearen Maßstabsraum systematisch in mehreren Maßstabsebenen untersucht.

Die Extraktion der Bäume erfolgt auf rein algorithmischem Wege: Nach dem Aufbau der Maßstabsraum-Repräsentation der Bilddaten erfolgt die Segmentierung in den einzelnen Maßstabsebenen mit der Wasserscheidentransformation. Die sich dabei ergebenden Segmente, jedes ein potenzieller Kandidat für eine Baumkrone, werden anschließend mit Fuzzy-Funktionen bewertet und auf der Basis dieser Bewertungen werden Hypothesen aufgestellt. Die Grundlage der Bewertung stellt die Kompatibilität des jeweiligen Segments mit dem Modell dar. In einem letzten Schritt wird für jede Hypothese die Abgrenzung der Baumkrone mit Hilfe einer Snake optimiert.

Zur Einschätzung der Leistungsfähigkeit des Ansatzes in unterschiedlichen Kontextregionen werden kleinere Beispielprojekte sowohl in Wohngebieten mit dörflichem und städtischem Charakter als auch in Waldgebieten dargestellt. Die Ergebnisse des automatischen Verfahrens werden mit denen verglichen, die ein menschlicher Interpret auf der Basis derselben Bilddaten erzielt, die für die automatische Extraktion verwendet worden sind. Basierend auf den Ergebnissen der einzelnen Projekte werden anhand von repräsentativen Szenenausschnitten die aufgetretenen Probleme diskutiert und mögliche Lösungsvorschläge angeboten. Die Arbeit wird abgeschlossen mit einer Bewertung des Ansatzes und Vorschlägen für weitere Entwicklungen.

### Technische Universität Berlin

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Berlin wurde am 18. Februar 2004 Frau **YASEMIN KUZU**, M.Sc.Eng., aus Istanbul zum Dr.-Ing. promoviert. Das Thema ihrer Dissertation lautet „*Volumetric Object Reconstruction by Means of Photogrammetry*“ (Volumetrische

Objektrekonstruktion mit Mitteln der Photogrammetrie). Gutachter waren Prof. Dr.-Ing. OLAF HELLWICH, Prof. Dr.-Ing. JÖRG ALBERTZ und Prof. Dr.-Ing. AYHAN ALKIS (Yildiz Technical University, Istanbul).

**Zusammenfassung:** In vielen Bereichen, wie Virtual Reality, Wissenschaft, Medizin und Unterhaltung wird die automatische Erstellung von 3D-Computer Modellen benötigt. In dieser Arbeit behandeln wir das Problem zur Erstellung photorealistischer Modelle aus Einzelbildern und präsentieren eine volumetrische Rekonstruktionstechnik, die auf Voxel-Modellen basiert.

Ein Ziel der Arbeit bestand darin, die System-Voraussetzungen so gering wie möglich zu halten, damit der Algorithmus auf möglichst vielen Gebieten Anwendung finden kann. Es wird eine Standard CCD-Videokamera verwendet, die auch die Möglichkeit besitzt, hoch auflösende Standbilder zu erfassen. Ein kreisförmiger Kameraaufbau ist dadurch realisiert worden, dass das Objekt auf einem Drehteller gedreht, die Kamera aber nicht bewegt wurde. Nach der Kamerakalibrierung sind die Bildorientierungen mittels einer Bündelblockausgleichung berechnet worden.

Ein etabliertes Verfahren der Computer Vision wurde verwendet, um ein genähertes Modell zu erstellen, da der Algorithmus schnell und einfach arbeitet. Für die Verfeinerung des Modells und zur Genauigkeitssteigerung sind auch Methoden der Photogrammetrie angewendet worden.

Das Objekt wird in mehreren Schritten rekonstruiert. Im ersten Schritt wird ein Volumen definiert, welches den gesamten auszuwertenden Bereich umschließt. Eine erste Näherung des Modells wird durch „Shape from Silhouette“, (Form aus Kontur) erreicht, aus dem die so genannte umgebende Hülle hervorgeht. Leider können in der umgebenden Hülle keine Konkavitäten des Objektes enthalten sein. Es werden mehrere Algorithmen vorgestellt, um diese Darstellung zu verfeinern. Ein wichtiger Faktor ist die Information über die Sichtbarkeit eines Voxels in einem bestimmten Bild. Es kann aus mehreren Gründen verdeckt sein. Wir stellen

einen Algorithmus vor, der diese Information schnell und zuverlässig anhand einer Linienverfolgung liefert. Darüber hinaus präsentieren wir ein Qualitätsmerkmal für die Sichtbarkeit, indem der Normalen-Vektor der Tangentialebene mit der Blickrichtung des Bildes in Beziehung gebracht wird. Diese Werkzeuge dienen neben anderen dazu, das Modell zu verfeinern.

Da nur Voxel der wahren Oberfläche auf korrespondierende Bildpunkte abgebildet werden, kann diese Tatsache helfen, um nicht Oberflächenvoxel auszuschließen. Die Prüfung auf Ähnlichkeit der Projektionen eines Voxels, lässt demnach Entscheidungen zu, ob es sich um ein Oberflächenvoxel handelt. Verschiedene Methoden der Ähnlichkeitsberechnung werden vorgestellt und bewertet. Mit Hilfe der vorgestellten Methoden gelingt es, die Konkavitäten der Objekt-oberfläche zu entfernen, so dass das fertige Modell dem Objekt tatsächlich entspricht.

### Technische Universität München

Prof. Dr.-Ing. habil. **RICHARD BAMLER** wurde zum 19. September 2003 auf den neu geschaffenen Lehrstuhl für *Methodik der Fernerkundung* der TU München berufen.

Die Leitung des Instituts für Methodik der Fernerkundung am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Oberpfaffenhofen, behält er bei. Richard Bamler studierte Nachrichtentechnik an der TUM und promovierte 1986 über mehrdimensionale optische Signalverarbeitung. 1988 habilitierte er an der TUM auf dem Gebiet der Signal- und Systemtheorie. 1989 trat er in das DLR ein und widmete sich der Satelliten-gestützten Umweltfernerkundung. 1998 wurde er in die kollegiale Leitung des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums des DLR berufen und leitet seit 2000 das Institut für Methodik der Fernerkundung. Die aktuellen Arbeiten sind auf den ersten deutschen Radarsatelliten TerraSAR-X ausgerichtet, der 2006 starten soll.  
e-mail: richard.bamler@dlr.de

Prof. Dr.-Ing. **UWE STILLA** wurde mit Wirkung vom 1. April 2004 als Professor und

Leiter des Fachgebiets für *Photogrammetrie und Fernerkundung* an die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München berufen.

UWE STILLA studierte Nachrichtentechnik an der Universität-Gesamthochschule Paderborn und danach Biomedizinische Technik an der Universität Karlsruhe. Seit 1991 arbeitet er am Forschungsinstitut für Informationsverarbeitung und Mustererkennung (FGAN-FOM) und promovierte 1993 über ein Thema aus dem Gebiet der automatischen Bildverarbeitung und Mustererkennung. Bei FGAN-FOM entwickelte er wissensbasierte Verfahren zur Gebäude-rekonstruktion und Fahrzeugerkennung aus Luft-, Infrarot-, LASER- und SAR-Bildern. Sein Forschungsschwerpunkt ist die automatische Analyse urbaner Szenen aus Bildern und Bildfolgen.

e-mail: uwe.stilla@bv.tum.de

### Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Ehrendoktor für Prof. **JÜRGEN ZASTRAU**, Dekan des Fachbereichs Geomatik an der AW Hamburg.

Am 5. März 2004 hat der Wissenschaftsrat der Moskauer Hochschule für Geodäsie und Kartographie dem HAW-Professor und Dekan des Fachbereichs Geomatik den Titel „Dr. h.c.“ verliehen. Prof. **JÜRGEN ZASTRAU** hat sich durch seine „bedeutenden Beiträge zur Weiterentwicklung der Geowissenschaften“ verdient gemacht, so in der Begründung von Prof. Dr. W.P. SAVINYKH, Rektor der MIIGAiK-Universität und ehemaliger Kosmonaut. Die russische Universität und die HAW sind seit vielen Jahren durch einen bestehenden Kooperationsvertrag miteinander verbunden, der seit 1990 federführend von dem Russland-Kenner, Prof. ZASTRAU, geprägt wurde. Im Rahmen dieser Partnerschaft findet jedes Jahr ein Austausch zwischen Moskauer und Hamburger Studierenden statt sowie ein Wissenschaftsaustausch der Professoren. Auch für diese „aktive Arbeit in der Stärkung der Kooperation zwischen Deutschland und Russland in der Ausbildung“ wurde Prof. ZAST-

RAU in der Laudatio gedankt. Die Übergabe der Urkunde erfolgte im Rahmen der Feierlichkeiten zum 225-jährigen Bestehen des MIGAiK vom 24.–27. Mai 2004.

## Universität Zürich

Herr **PHILIPP HIRTZ** wurde am 6. Februar 2003 an der Mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Zürich mit der Dissertation „*A Framework to Interactively Compose Realistic 3D Landscape Visualizations*“ zum Dr. sc. nat. promoviert.

Gutachter waren Prof. Dr. IAN D. BISHOP, University of Melbourne, Prof. Dr. KLAUS I. ITTEN, Zürich und Prof. Dr. DANIEL NÜESCH, Zürich.

Die Dissertation ist 2003 im Druck und auf CD-ROM erschienen in Remote Sensing Series, Vol. 39. Remote Sensing Laboratories, Department of Geography, University of Zurich.

## Zusammenfassung

Visualisierungen können wertvolle Dienste zur Beschreibung und Kommunikation der visuellen Charakteristika einer realen Landschaft leisten. Die Entwicklung effizienter Soft- und Hardware im Bereich der Computergrafik ermöglicht es heute, komplexe realistisch wirkende Landschaftsvisualisierungen zu erstellen. Diese können mittlerweile auf einem handelsüblichen Personal Computer in Echtzeit dargestellt werden. In der Regel basieren heutige Echtzeit-Visualisierungen auf vorgerechneten Datensätzen, welche die virtuelle Szenerie beschreiben. Die wenigsten dieser Visualisierungen können interaktiv modifiziert werden und beinhalten wenig bis keine semantische Information über die dargestellten Daten. Neben der Redundanz zu den Datenquellen weisen vorgerechnete Datensätze den großen Nachteil auf, dass sie nur beschränkte Flexibilität zur Verfügung stellen, um eine applikationsspezifische Visualisierung zu erzeugen.

Das *wissenschaftliche Ziel* dieser Arbeit bildet die Entwicklung eines Konzeptes, das die interaktive Komposition einer realistischen 3D-Landschaftsvisualisierung, die in

Echtzeit erzeugt werden kann, erlaubt. Die Komposition beinhaltet das Hinzufügen, Entfernen, Ersetzen und Modifizieren von Landschaftselementen während der Laufzeit einer Visualisierung. Dabei soll auf verschiedene geographische Datenquellen wie zum Beispiel digitale Geländemodelle, Fernerkundungsdaten oder andere landschaftsbeschreibende Informationen zurückgegriffen werden können.

Das *technische Ziel* beinhaltet die Evaluation und die Implementation von Modellierungstechniken, die geographische Daten in computergraphische Beschreibungen überführen, die in Echtzeit betrachtet werden können. Die Modellierung der virtuellen Landschaft soll dabei während der Laufzeit einer Visualisierung erfolgen können. Ein Software Prototyp setzt das theoretische Konzept in eine lauffähige Applikation um. Es beinhaltet ein Modul zur Komposition der Visualisierung, ein Datenmodell, das die Geometrie und die Semantik der virtuellen Landschaft beschreibt, sowie ein Modul zur effizienten Bilderzeugung.

Das Konzept basiert auf einer Unterteilung der realen Landschaft in verschiedene Klassen. Diese Klassen umfassen die Geländeoberfläche, die Vegetation, die Infrastruktur (zum Beispiel Gebäude) sowie atmosphärische Phänomene. Die Konzeption der Software beinhaltet ein Kompositionsmodul, das dem Benutzer erlaubt, den Inhalt der Visualisierung durch Hinzufügen, Ersetzen oder Entfernen von Landschaftselementen zu verändern. Nach jeder Modifikation der virtuellen Welt wird die Visualisierung der veränderten Szenenbeschreibung angepasst. Der Kern des Gesamtsystems besteht aus einer Szenenbeschreibung, welche die Geometrie der Landschaftselemente sowie deren Semantik beinhaltet. Die semantischen Informationen können dabei explizit oder über einen Verweis auf die Datenquelle repräsentiert sein. Dies erlaubt eine Minimierung an erzeugter Redundanz zwischen Szenenbeschreibung und Datenquelle. Spezialisierte Softwaremodule stellen für jedes Landschaftselement Methoden zur Verfügung, die es erlauben, die geographische Information entsprechend den Anforderun-

gen der Visualisierung zu interpretieren. Die modulare Struktur der Software erlaubt es, unterschiedliche Ansätze zur Datenmodellierung zu implementieren sowie zusätzliche Landschaftselemente zu berücksichtigen.

Über das Ausgabebild des Visualisierungssystems können Anfragen an die dargestellten Landschaftsobjekte formuliert werden. Das System erkennt das angefragte Objekt und extrahiert dessen semantische Informationen aus der Szenenbeschreibung.

Es existieren verschiedene Algorithmen, um die Komplexität von digitalen Geländemodellen für die effiziente Verarbeitung in der Echtzeit-Visualisierung zu reduzieren. Für diese Arbeit wurde ein Ansatz gewählt, der die Geländeoberfläche mit unregelmäßig triangulierten Dreiecksnetzen approximiert. Diese stellen die flexibelsten Datenstrukturen zur Verfügung, um ein Gelände mit hoher Genauigkeit zu repräsentieren. Dabei sind die Punkte der Triangulation nicht an ein vorgegebenes Raster gebunden. Diese Eigenschaft erleichtert die Kombination von Geländemodellen aus verschiedenen Datenquellen und die lokale objektbasierte Verbesserung der Geländegeometrie.

Für die realistische Visualisierung werden dem Geländemodell Texturen überlagert, die von Fernerkundungsdaten abgeleitet werden. Um die zu verarbeitende Datenmenge zu reduzieren, wird die Auflösung der Texturen der Betrachterdistanz angepasst. Die Geländedatenbasis wird dabei in quadratische Zellen unterteilt. Dies ermöglicht den effizienten Einsatz von distanzabhängigen Auflösungsstufen für Geometrie und Textur. Dabei können Texturen unterschiedlicher Auflösung und von unterschiedlichen Datenquellen kombiniert werden.

Um die Möglichkeiten der interaktiven Komposition einer Visualisierung zu illustrieren werden einige Techniken gezeigt, die es erlauben, eine bestehende Visualisierung lokal, basierend auf zusätzlichen Datenquellen, zu modifizieren.

Eine weitere Möglichkeit zur lokalen Verbesserung des Datenmodells ist die Integration von Straßen in das triangulierte Gelän-

demodell. In früheren Ansätzen wurde die Straße mit konstanter Breite entlang ihrer Zentrumslinie konstruiert. Der neu entwickelte Ansatz basiert hingegen auf einer Straßenbeschreibung, welche die Außenbegrenzungen der Straßen mittels Polygonen repräsentiert. Der Algorithmus integriert diese Polygonlinien in das triangulierte Geländemodell und nivelliert die Straße in ihrer Querachse. Er wurde dahingehend optimiert, dass eine visuell glaubwürdige Anpassung des Geländes im Bereich von Kreuzungen und Verzweigungen möglich ist.

Die interaktive Komposition einer Landschafts-Visualisierung wird mit einigen Anwendungsbeispielen illustriert. Diese enthalten eine kleinmaßstäbliche Visualisierung sowie detaillierte Visualisierungen mit lokaler Modifikation von Textur und Straßengeometrie. Weiter zeigen sie die Integration von Objekten wie Bäumen und Gebäuden in die virtuelle Landschaft.

## ETH Zürich

An der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Department Bau, Umwelt und Geomatik, findet im Wintersemester 2004/2005 zum wiederholten Mal der *Nachdiplomkurs über räumliche Informationssysteme (RIS)* statt. Er vermittelt das erforderliche Wissen über die Bearbeitung raumbezogener Daten mit räumlichen Informationssystemen und richtet sich an Fachleute, die sich in ihrem Berufsfeld vorwiegend mit Geodaten befassen.

Der Kurs dauert insgesamt fünf Wochen. Die Termine sind:

8.–12. Nov. 2004, 6.–10. Dez. 2004, 10.–14. Jan. 2005, 7.–11. Feb. 2005, 7.–11. März 2005. Anmeldeschluss ist der 10. Sept. 2004. Die Kursgebühr beträgt 2900 Fr.

Detaillierte Informationen: [www.photogrammetry.ethz.ch/ndk](http://www.photogrammetry.ethz.ch/ndk) und NDK-Sekretariat, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Hönggerberg, CH-8093 Zürich (Frau S. Sebestyen, Tel.: 01-633-3157, e-mail: [sebestyen@geod.baug.ethz.ch](mailto:sebestyen@geod.baug.ethz.ch); Frau K. Wolff, Tel.: 01-633-3054, e-mail: [wolff@geod.baug.ethz.ch](mailto:wolff@geod.baug.ethz.ch)).

## Vorankündigungen

### 2004

23.–25. August: 11<sup>th</sup> International Symposium on **Spatial Data Handling (SDH 2004)** in **Leicester**, UK. Auskünfte durch: SDH 2004, e-mail: [sdh2004@le.ac.uk](mailto:sdh2004@le.ac.uk), [www.geog.le.ac.uk/sdh2004](http://www.geog.le.ac.uk/sdh2004)

25.–28. August: **EuroScience Open Forum 2004** in **Stockholm**. Auskünfte durch: EuroScience, e-mail: [info@esof2004.org](mailto:info@esof2004.org) [www.esof2004.org/](http://www.esof2004.org/)

25.–28. August: International Conference on **E-business and Telecommunication Networks (ICETE 2004)** in **Setubal**, Portugal. Auskünfte durch: ICETE Secretariat, e-mail: [secretariat@icete.org](mailto:secretariat@icete.org), [www.icete.org/](http://www.icete.org/)

30. August-1. September: **DAGM'04** – 26<sup>th</sup> Pattern Recognition Symposium Max Planck Institute for Biological Cybernetics and University of Tübingen, Germany, in **Tübingen**. Auskünfte durch: <http://dagm.tuebingen.mpg.de>, e-mail: [dagm@tuebingen.mpg.de](mailto:dagm@tuebingen.mpg.de), Tel.: +49-7071-601 551

7.–10. September: **RSPSoc2004 – Mapping and Resources Management** in **Aberdeen**, UK. Auskünfte durch: RSPSoc, e-mail: [rspsoc@nottingham.ac.uk](mailto:rspsoc@nottingham.ac.uk); [www.rsp-soc.org](http://www.rsp-soc.org)

12.–14. September: FOSS/ GRASS Conference 2004 **Free and Open Source Software (FOSS) for Geoinformatics: GIS-GRASS User Conference** in **Bangkok**. Auskünfte durch: Conference Secretary Tel.: +66-2-218-6661, Fax: +66-2-218-6653, e-mail: [grass04\\_office@gisws.media.osaka-cu.ac.jp](mailto:grass04_office@gisws.media.osaka-cu.ac.jp), [www.rspsoc.org](http://www.rspsoc.org)

15.–17. September: **24. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF** mit dem Leitthema »**Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation: Instrumentarium zur nachhaltigen Entwicklung von Landschaften**« in **Halle/Saale**. Auskünfte durch: Sekretär der DGPF, Dr.-Ing. Manfred Wighenhagen, e-mail: [wigge@ipi.uni-hannover.de](mailto:wigge@ipi.uni-hannover.de) und Frau Prof. Dr. Cornelia Gläßer, e-mail: [glaesser@geographie.uni-halle.de](mailto:glaesser@geographie.uni-halle.de)

15.–18. September: **44. Wissenschaftliche Tagung des Deutschen Markscheider-Verein e.V. (DMV)** in **Bochum**. Motto der Veranstaltung im 125. Jahr des Bestehens des DMV: „...aus Tradition modern.“ Auskünfte durch: Peter Fischer, Hünxer Str. 368, 46537 Dinslaken, Fax: 02064-61-22 95, e-mail: [peter.fischer@deutsche-steinkohle.de](mailto:peter.fischer@deutsche-steinkohle.de) [www.markscheider-dmv.rwth-aachen.de](http://www.markscheider-dmv.rwth-aachen.de)

16.–18. September: International Symposium on **GeoInformatics for Spatial-Infrastructure Development in Earth & Allied Sciences (GIS-IDEAS 2004)** in **Hanoi**. Auskünfte durch: GIS-IDEAS 2004 Secretariat Tel.: +84-4-756 2417, Fax: +84-4-836 1192, e-mail: [gisideas2004@pmail.vnn.vn](mailto:gisideas2004@pmail.vnn.vn), [www.gisws.media.osaka-cu.ac.jp/gisideas04/](http://www.gisws.media.osaka-cu.ac.jp/gisideas04/)

20.–24. September: **IEEE/IGARSS 2004 in Anchorage**, USA. Auskünfte durch: Dr. Bill Emery, e-mail: [Emery@frodo.colorado.edu](mailto:Emery@frodo.colorado.edu), <http://ewh.ieee.org/soc/grss/igarss.html>

21./22. September: **AgA-Tagung** „Arbeitsgruppe **Automation in der Kartographie** der DGfK“ im Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung der Stadt **Hamburg**. Auskünfte und Einreichung von Beiträgen: [www.ikg.uni-hannover.de/ega](http://www.ikg.uni-hannover.de/ega)

21.–23. September: International Symposium and Exhibition on **Geoinformation 2004 (ISG2004)** in **Kuala Lumpur**. Auskünfte durch: Prof. Dr. Shattri Mansor, Tel.: +603-8946-7543, Fax: +603-8656-6061, e-mail: [isg2004@itma.upm.edu.my](mailto:isg2004@itma.upm.edu.my), [www.itma.upm.edu.my/isg2004](http://www.itma.upm.edu.my/isg2004)

26.–29. September: 3<sup>rd</sup> EARSeL Workshop on **Special Interest Group on Remote Sensing for Developing Countries in Cairo**. Auskünfte durch: EARSeL Sekretariat e-mail: earsel@meteo.fr, <http://www.geoweb.ugent.be/earsel/>

27.–29. September: **GIS 2004-3<sup>rd</sup> International Conference & Exhibition in Manama, Bahrain**. Auskünfte durch: Sekretariat GIS 2004, Tel.: +973-17-72 7100, Fax: +973-17-72 9819, e-mail: gors@gors-syr.org, [www.engineer-bh.com/gis3/](http://www.engineer-bh.com/gis3/)

27.–30. September: 14<sup>th</sup> International Symposium on **Remote Sensing and Development in Damaskus**. Auskünfte durch: GORS, Tel.: +963-11-221 8765, Fax: +963-11-391-0700, e-mail: gors@gors-syr.org, [www.gors-syr.org](http://www.gors-syr.org)

3.–6. Oktober: International Conference on **Laser-Scanner for Forest and Landscape Assessment – Instruments, Processing Methods and Applications in Freiburg** im Breisgau. Auskünfte durch: Institut für Waldwachstum und Abteilung für Fernerkundung und Landschaftsinformationssysteme der Universität Freiburg, Tennenbacher Str.4, 79106 Freiburg i. Br., Tel.: +49-761-203-36 94, Fax: +49-761-203-37 01, Prof. Dr. Barbara Koch, e-mail: Barbara.Koch@felis.uni-freiburg.de  
Prof. Dr. Heinrich Spiecker, e-mail: inststw@uni-freiburg.de  
Michael Thies, e-mail: Michael.Thies@iww.uni-freiburg.de [www.natscan.de](http://www.natscan.de), [www.felis.uni-freiburg.de](http://www.felis.uni-freiburg.de)

3.–7. Oktober: **FIG Regional Conference for Asia and the Pacific in Jakarta**. Auskünfte durch: FIG Office, e-mail: fig@fig.net, [www.ddl.org/figtree/events/events2004.htm](http://www.ddl.org/figtree/events/events2004.htm)

7./8. Oktober: 1<sup>th</sup> Göttingen GIS & Remote Sensing Days: **GGRS 2004 Environmental Studies in Göttingen**. Auskünfte durch: Mrs. Catrin Kollatschny, Conference secretary, Geographisches Institut, Abt. Kartographie, GIS & Fernerkundung, Goldschmidt-

str. 5, 37077 Göttingen, Tel.: +49-551-39-9805, Fax: +49-551-39-8020, e-mail: GGRS@uni-goettingen.de, [www.ggrs.uni-goettingen.de](http://www.ggrs.uni-goettingen.de)

13.–15. Oktober: **INTERGEO 2004** mit dem Leitthema »Für mobile Menschen« in **Stuttgart**. Auskünfte durch: [www.dvw.de](http://www.dvw.de), [www.intergeo2004.de](http://www.intergeo2004.de) und [www.hinte-messe.de](http://www.hinte-messe.de)

13.–15. Oktober: **52. Deutscher Kartographentag** der DGfK mit dem Leitthema »Kernkompetenzen der Kartographie« im Rahmen der INTERGEO 2004 in **Stuttgart**, Messe-Congresszentrum. Auskünfte durch: Heinz Morhard, e-mail: heinz.morhard@vermbw.bwl.de

13.–16. Oktober: 4<sup>th</sup> **Trans Tasman Surveyors Conference** in **Auckland**, Neuseeland. Auskünfte durch: Fax: 64-9-528 1656; e-mail: [surveyors2004@cmcevents.co.nz](mailto:surveyors2004@cmcevents.co.nz), [www.conventions.co.nz](http://www.conventions.co.nz)

18.–21. Oktober: 5<sup>th</sup> **African Association of Remote Sensing of the Environment (AARSE)** in **Nairobi**. Auskünfte durch: AARSE 2004, Tel.: +254-2-80 2767, e-mail: [rcmrd@rcmrd.org](mailto:rcmrd@rcmrd.org)

18.–21. Oktober: **International Conference on Remote Sensing Archaeology in Beijing**. Auskünfte durch: Dr. Wang Changlin, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences. P.O.Box 9718, Beijing 100101, China, Tel.: 86-10-64838047, Fax: 86-10-64879740, e-mail: [wcl@irsa.irsa.ac.cn](mailto:wcl@irsa.irsa.ac.cn)

18.–22. Oktober: **VIII International Earth Sciences Congress**, veranstaltet vom Military Geographic Institute of Chile in **Santiago de Chile**. Auskünfte: e-mail: [cct2004@igm.cl](mailto:cct2004@igm.cl), <http://www.igm.cl/Cct2004/English/index.htm>

18.–22. Oktober: 12<sup>th</sup> **Australasian Remote Sensing & Photogrammetry Conference** in **Fremantle/Perth**, Australien. Auskünfte durch: Ken Dawbin, Tel.: +61-8-9387 0333,

Fax: +61-8-9383 7142, e-mail: Ken.Dawbin@dli.wa.gov.au, www.rss.dola.wa.gov.au/12arspc/

19.–21. Oktober: International Conference on Radar Systems **RADAR 2004** in **Toulouse**, Frankreich. Auskünfte durch: SEE Congress Dept., Tel.: +33-1-56-90 37 05, Fax: +33-1-56-90 37 19, e-mail: congress@see.asso.fr, www.radar2004.org

19.–22. Oktober: 8<sup>th</sup> Congress in **Surveying and Cartography – TOPCART 2004** in **Madrid**. Auskünfte durch: COIT-TOP, Tel.: +34-91-553 8965, Fax: +34-91-533 4632, e-mail: coit\_top@arrakis.es, http://www.top-cart.com

20.–22. Oktober: ICA/ DGfK – Konferenz mit Ausstellung **Cartographic Cutting-Edge Technology for Natural Hazard Management** in **Dresden**. Auskünfte durch: Prof. M. Buchroithner/ Frau Steffi Sharma, Technische Universität Dresden, Institut für Kartographie, D-01062 Dresden, Tel.: +49-351-463-34809/ 37562, Fax: +49-351-463-37028, e-mail: Steffi.Sharma@ mailbox.tu-dresden.de oder: Manfred.Buchroithner@ mailbox.tu-dresden.de

25.–27. Oktober: **CIPA** International Workshop on **Vision Techniques Applied to the Rehabilitation of City Centres** in **Lisbon**. Auskünfte durch: Vitor Campos, Tel.: +351-21-891-93334, e-mail: mchambel@parqueexpo.pt, www.visiontec-workshop.org/

25.–29. Oktober: **Laser Ranging (LIDAR)** M. Sc. course in Airborne Photogrammetry and Remote Sensing in **Barcelona**. Auskünfte durch: Institute of Geomatics, e-mail: info@ideg.es; www.IdeG.es; Tel.: +34-93-556-92 80, Fax: +34-93 556- 92 92

4./5. November: International Symposium **Modern Technologies, Education & Professional Practice in Geodesy & Related Fields** in **Sofia**. Auskünfte durch: Prof. Dr. Georgi Milev, Tel.: +35-92-987-58 52, Fax: +35-92-987-93 60, e-mail: milev@bas.bg, www.acstre-ma.tu-sofia.bg

8.–12. November: **Interferometric Synthetic Aperture RADAR**. M. Sc. course in Airborne Photogrammetry and Remote Sensing in **Barcelona**. Auskünfte durch: Institute of Geomatics, e-mail: info@ideg.es; www.IdeG.es; Tel.: +34-93-556-92 80, Fax: +34-93 556-92 92

15.–18. November: **SHRUG 3<sup>rd</sup>** Annual GIS Workshop **Mapping our Future** in **Tallahassee**, Florida, USA. Auskünfte durch: Holli M. Brandt, Tel.: +1-850-245-8539, e-mail: Holli.Brandt@dep.state.fl.us, http://www.shrug-gis.info/

15.–19. November: **XI Latinamerican Remote Sensing and Spatial Information System Symposium** in **Santiago**, Chile. Auskünfte durch: Carlos G. Pattillo, Co-Chair WG VI/4, Tel.: +562-334-39 23, Fax: +562-946-03 02, e-mail: Carlos.Pattillo@cprsig.cl, www.acstre-ma.tu-sofia.bg

18.–20. November: ISPRS WG V/6 International Workshop on **Processing & Visualization using High-Resolution Imagery** in **Pitsanulok**, Thailand. Auskünfte durch: Prof. Armin Gruen, Chair WG V/6, e-mail: agruen@geod.baug.ethz.ch und Dr. Sirirat Sanyong, Tel.: +66-55-261 000 ext.1152, e-mail: siriratsy@hotmail.com, www.photoграмmetry.ethz.ch/pitsanulok\_workshop/index.html

19.–21. November: 2. Jahrestagung des AK Fernerkundung (DGfG) „**Erfassung von Zustandsgrößen und Prozessen mit Fernerkundung**“ in **Bonn**. Auskünfte durch: Zentrum für Fernerkundung der Landesoberfläche, c/o Ellen Götz, Walter-Flex-Str. 3, 53113 Bonn, Tel.: 0228-73-4978, Fax: 0228-73-6857, e-mail: zfl@uni-bonn.de

22.–26. November: **The 25<sup>th</sup> Asian Conference on Remote Sensing** (ACRS 2004) in **Chiang Mai**, Thailand. Auskünfte durch: Dr. Suvit Vibulsresth, Tel.: +662-561-3035, e-mail: suvit@gistda.or.th, www.gistda.or.th www.aars-acrs.org

4.–7. Dezember: ISPRS WG I/4 International Conference on **Advanced Remote Sens-**

**ing for Earth Observation; Systems, Techniques and Applications in Riyadh**, Saudi Arabien. Auskünfte durch: Dr. Raad A. Saleh, Tel.: +1-608-204-9122, e-mail: raad@remotesensingara.com, www.remotesensingara.com

## 2005

2./3. Februar: **4. Oldenburger 3D-Tage: Optische 3D-Messtechnik-Photogrammetrie-Laserscanning in Oldenburg**. Organisation: Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik (IAPG), FH Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven Arbeitskreis Nahbereichsphotogrammetrie der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF). www.fh-oow.de/3dtage Letzter Termin zur Einreichung eines Vortrages: 15.11.2004

7.–11. Februar: **6<sup>th</sup> Barcelona Geomatic Week in Barcelona**. Auskünfte durch: Lídia Gargallo, e-mail: info@ideg.es, www.ideg.es/

20.–26. Februar: **13. Internationale Geodätische Woche in Obergurgl**, Tirol, Österreich. Auskünfte durch: Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Institut für Geodäsie, Prof. Dr. Günter Chesi, Tel.: +43-512-507 6757 oder 6755, Fax: +43-512-507 2910, e-mail: geodaetischewoche@uibk.ac.at, http://geodae.sie.uibk.ac.at/geod\_wo.html

24.–26. Februar: **Von Handaufmaß bis High Tech – II**, Interdisziplinäres Kolloquium in **Cottbus**. Auskünfte durch: Lehrstuhl für Baugeschichte, Lehrstuhl für Vermessungskunde, Fakultät 2; Brandenburgische Technische Universität Cottbus, PF 101344, 03013 Cottbus. Tel.: 0355-69 3117, Fax: 0355-69 2984, e-mail: handhigh@tu-cottbus.de, www.tu-cottbus.de/hand\_high. Anmeldung von Beiträgen: bis 30.6.2004

7.–11. März: **ASPRS Annual Conference in Baltimore**, USA. Auskünfte durch: ASPRS, Tel.: +1-301-493 0290, Fax: +1-301-493 0208, e-mail: asprs@asprs.org, www.asprs.org/asprs/meetings/calendar.html

14.–16. März: Joint Conference on **Remote Sensing of Urban Areas in Tempe**, Arizona, USA. Auskünfte durch: Dr. Matthias S. Moeller, Geoinformatics & Remote Sensing Center for Environmental Studies, Arizona State University, Box 873211, Tempe, AZ 85287-3211, Tel.: 001-480-9650987, mail-to: Matthias.moeller@asu.edu; Charles L. Redman, e-mail: charles.redman@asu.edu; http://www.urban-remote-sensing.org

16.–21. April: **FIG Working Week 2005 and XXVIII General Assembly in Cairo**. Auskünfte durch: FIG Office, Tel.: +45-38-861081, Fax: +45-38-86 0252, e-mail: fig@fig.net

8.–10. Juli: ISPRS IC WG II/IV und 6<sup>th</sup> Joint **ICA/ ISPRS/ EuroGeographics Workshop on Incremental Updating & Versioning of Spatial Data Bases in A Coruña**, Spanien. Auskünfte durch: Dr. Ammatzia Peled, Co-chair IC WG II/IV, Tel.: +972-4-8-240 148, Fax: +972-4-8-249 605, e-mail: peledqgeo.haifa.ac.il; www.geo.haifa.ac.il/~icaupdt/meetings/meetings.htm

9.–16. Juli: **XXII ICA International Cartographic Conference in A Coruña**, Spanien. Auskünfte durch: Global Congressos, Tel.: +34-981-208 990, Fax: +34-981-208 701, e-mail: secretary@icc2005.org, www.icc2005.org/html-eng/english.html

26.–30. September: **XX Symposium of CIPA, the ICOMOS & ISPRS Committee on Documentation of Cultural Heritage in Torino**, Italien. Auskünfte durch: ACTA Congresses and Events, Tel.: +39-11-59 18 71, Fax: +39-11-59 08 33, e-mail: info@acta-congress.com; http://www.cipatorino2005.org

27.–29. September: **INTERGEO 2005 in Düsseldorf**. Auskünfte durch: www.dvw.de www.intergeo2005.de und www.hinte-messe.de

3.–5. Oktober: 7<sup>th</sup> International Conference on **Optical 3-D Measurement Techniques** in Wien. Auskünfte durch: Conference secretary, e-mail: conf@pop.tuwien



## Buchbesprechung

WILFRIED LINDNER, (2003): Digital Photogrammetry – Theory and Applications. With 44 Fig., a CD-Rom and 3D Glasses, 189 S., kartoniert, Springer, ISBN 3-540-00810-1

Aufgrund des hohen Digitalisierungsgrades in der Photogrammetrie und der günstigen Verfügbarkeit schneller Computer ist heute der potenzielle Anwenderkreis für Photogrammetrie so hoch wie nie zuvor. Im Besonderen sind Fachleute benachbarter Disziplinen, wie Geographie, Geologie oder Forstwirtschaft, an den Methoden und Ergebnissen digitaler Photogrammetrie interessiert. Und es ist diese Gruppe von *Nicht-Photogrammetern*, an die sich das Buch „Digital Photogrammetry – Theory and Applications“ von WILFRIED LINDER hauptsächlich richtet.

Das Buch verfolgt die „learning-by-doing“-Methode, die den Leser einlädt alle Schritte selbst nachzuvollziehen. Zu diesem Zweck liegt dem Buch eine Software-CD bei, die Demo-Versionen der Raster-GIS-Software LISA BASIC, der digitalen Photogrammetrischen Arbeitsstation LISA FOTO und des Ausgleichsprogramms BLUE enthält. Anhand dieser Demo-Software und mitgelieferter Beispieldatensätze wird den interessierten Neulingen die Welt der digitalen Photogrammetrie, mit Betonung des Luftbildfalls, näher gebracht: vom Scannen der Bilder bis zu den Endprodukten Geländemodell und Orthophoto.

Das Buch ist in 7 Kapitel unterteilt. Im Einführungskapitel (12 Seiten) werden das Grundprinzip der photogrammetrischen Punktbestimmung, analoge und digitale Kameras, ein geschichtlicher Abriss der Auswerteverfahren, sowie einige wenige geometrische Zusammenhänge (Bildmaßstab, Flughöhe, Kamerakonstante) erklärt.

Es folgen zwei kurze Kapitel (je 6 Seiten), in denen zum einen auf die mitgelieferte Software und deren Installation eingegangen wird, und zum anderen kurz die Begriffe

geometrische und radiometrische Auflösung, sowie das Scannen von analogen Luftbildern beschrieben wird.

Im vierten Kapitel (40 Seiten) wird der erste Beispieldatensatz, ein Luftbildmodell, bearbeitet: Zunächst wird für jedes Einzelbild die innere und äußere Orientierung im Programm LISA durchgeführt. Anschließend erfolgt die stereoskopische Auswertung im Luftbildmodell, wobei die Stereoskopie in LISA mittels Anaglyphen-Verfahren realisiert wird. Die dafür benötigten Rot-Grün-Brillen liegen dem Buch bei. Weiter wird ein digitales Oberflächenmodell aus dem Luftbildmodell mittels flächenbasiertem Matching abgeleitet und abschließend dazu verwendet, um aus den beiden Luftbildern ein Orthophotomosaik zu erzeugen. Die für das Verständnis notwendige Theorie (Bedeutung von Passpunkten, Notwendigkeit für Überbestimmung,  $y$ -Parallaxen nach der Orientierung, Unterscheidung: Geländemodell und Oberflächenmodell, flächenbasiertes Matching, Orthophoto-Erzeugung) ist kompakt in die Beschreibung der praktischen Durchführung eingebettet.

Im fünften Kapitel (34 Seiten) wird ein zweiter Beispieldatensatz, ein Block von 21 Luftbildern, mittels Aerotriangulation orientiert. Es wird gezeigt, wie die Messung der notwendigen Verknüpfungspunkte in LISA manuell oder automationsunterstützt durchgeführt werden kann und wie mit Hilfe des Programms BLUE die Aerotriangulation berechnet wird. Es wird auch angesprochen, wie grobe Fehler in den Messungen eliminiert werden können. Analog zum ersten Beispielkapitel wird auf die Theorie (hier: Aerotriangulation und Bündelblockausgleichung) kurz während der Beschreibung der praktischen Durchführung eingegangen.

Im sechsten Kapitel (22 Seiten) werden einige spezielle Anwendungen angesprochen: (i) das Scannen von Luftbildern mit einem A4-Scanner für Projekte geringerer Genauigkeit und wie daraus mit LISA voll-

formatige digitale Luftbilder abgeleitet werden können und (ii) zwei Anwendungsbeispiele (mit Beispieldatensätzen) der Nahbereichsphotogrammetrie mit digitalen Kameras.

Den Abschluss des Buches bilden das siebente Kapitel (39 Seiten) mit einer zusammenfassenden Beschreibung der mitgelieferten Software und der Anhang (19 Seiten), der Passpunktübersichten für die Luftbilder des zweiten Beispieldatensatzes enthält.

*Resümee:* Da sich dieses Buch in erster Linie an Nicht-Photogrammeter richtet, erscheint die Titelwahl „Digital Photogrammetry – Theory and Applications“ etwas unglücklich gewählt: (i) Erfahrene Photogrammeter fühlen sich zu sehr angesprochen und erwarten aufgrund des allgemein gehaltenen Titels eher ein Standardwerk über digitale Photogrammetrie mit Betonung der Theorie (etwa der Bildverarbeitung), was das Buch aber nicht bietet; und (ii) Vertreter der eigentlichen Zielgruppe, die an einer Einführung in Photogrammetrie interessiert sind, fühlen sich durch den Titel womöglich zu wenig angesprochen. Hier wäre ein Titel der Art „Getting Started with Photogrammetry“ wohl passender gewesen.

Ziel des Buches ist es, eine Einführung in die Methoden und Ergebnisse der Photogrammetrie zu geben und dass der Leser anhand der beigelegten Demosoftware Photogrammetrie selbst ausprobieren kann. Das Buch hat daher einen sehr praktischen Charakter und verzichtet auf all zuviel Theorie. So gibt es nur sieben referenzierte Formeln und Begriffe wie etwa Bildhauptpunkt, Bildverzeichnung oder Erdkrümmung werden erwähnt aber nicht näher erläutert.

Da das Buch den praktischen Zugang anhand der Beispieldaten und deren Handha-

bung mit der beiliegenden Software betont, erinnern Stil und Aufbau des Buches an ein ausführliches Software-Manual mit zusätzlich eingefügten Theorieabschnitten. Dies hat den Vorteil, dass Theorie dort gebracht wird, wo sie gerade beim praktischen Arbeiten mit der Software benötigt wird, birgt jedoch den Nachteil, dass das gezielte Nachschlagen bestimmter Begriffe mühsamer ist.

Wünschenswert wäre es gewesen, wenn dem Thema der Genauigkeit der Ergebnisse mehr Bedeutung geschenkt worden wäre. Diese Thematik mag vielleicht nicht das primäre Interesse der angesprochenen Lesergruppe sein, jedoch sollte man die Gelegenheit nutzen und ein Bewusstsein dafür erzeugen, dass die vom Computer auf Millimeter ausgegebenen Koordinaten anders zu interpretieren sind, wenn der Bildmaßstab 1:5 000 oder 1:30 000 lautet.

Bei einer zu erwartenden Neuauflage – mit anderem Titel – könnte dieser Wunsch berücksichtigt werden. Auch wären manche Aussagen in den theoretischen Abschnitten zu korrigieren; so stellt das UTM-System kein Kartesisches System dar (S. 8), oder basiert die Bündelblockausgleichung nicht auf dem Rückwärtsschnitt (S. 80), sondern auf den Kollinearitätsgleichungen.

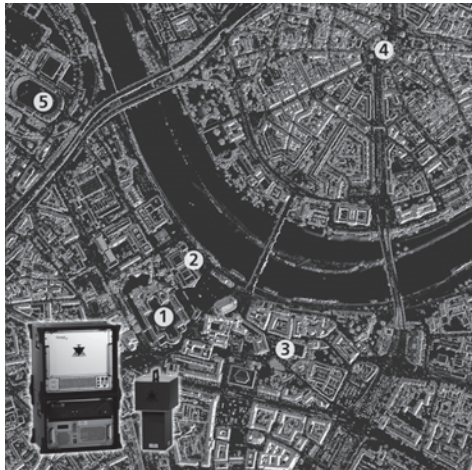
Zusammenfassend ist zu sagen, dass das Buch sein Ziel erfüllt. Es bietet Nicht-Photogrammetern einen interessanten und lohnenden Einstieg in die Welt der Photogrammetrie. Besonders die mitgelieferte Software mit der einfachen Stereobetrachtung und der Möglichkeit, Endprodukte wie Geländemodell oder Orthophoto selbst herzustellen, sollte bei Einsteigern Anklang finden.

CAMILLO RESSL, WIEN

## Zum Titelbild

### „Schattenbild“ von Dresden

Die Titelseite zeigt einen Ausschnitt der Stadt Dresden



Dargestellt ist der zentrale Bereich beiderseits der Elbe. Deutlich zu erkennen sind der Zwinger (1) mit der angrenzenden Semperoper (2) am Theaterplatz. Östlich davon liegt die Frauenkirche (3), hier noch in der Wiederaufbauphase. Am nördlichen Bildrand liegt am Ende der Hauptstraße der Inneren Neustadt der Albertplatz (4), an dem mehrere Straßen sternförmig zusammenlaufen. Ebenso deutlich ist am westlichen Rand des Bildausschnittes das Heinz-Steyer-Stadion (5) zu erkennen.

Bei der Darstellung handelt es sich um ein Schattenbild, das farblich überarbeitet wurde. Das Schattenbild, oder auch Shading genannt, basiert auf einem aus Laserpunkten generierten Oberflächenmodell.

Grundlage für diese Darstellung ist eine Laserscannermessung aus dem Jahr 2000, die von der Firma TopScan GmbH im Auftrag des Landesvermessungsamtes Sachsen durchgeführt wurde. Die Laserscannermessung entlang der Elbe zwischen Pirna und Meißen erfolgte am 13. 11. 2000. Dabei wurde eine Fläche von 200 km<sup>2</sup> mit rund 100 Mio. Punkten aufgemessen. Der mittlere

Punktabstand liegt bei 1,4 m. Daraus wurde dann ein Oberflächenmodell mit 1m Gitterweite berechnet.

Die Laserscannermessung ist ein flugzeuggestütztes Verfahren zur topographischen Geländeaufnahme. Sie ist gekennzeichnet durch einen weitgehend automatisierten Messablauf mit vollständig digitaler Datenaufzeichnung und anschließender rein computerbasierter Auswertung. Die Erfassung großer Gebiete mit einer hohen Punktdichte bei hoher Präzision kann damit zügig und kostengünstig erfolgen.

Bei der Laserscannermessung werden von einem im Flugzeug eingebauten System in regelmäßigen Abständen Laserimpulse ausgesendet, welche vom Erdboden und den darauf befindlichen Objekten reflektiert werden. Durch Laufzeitmessung wird die Entfernung zwischen dem Laser und der Geländeoberfläche bestimmt. Der Laserimpuls wird zudem quer zur Flugrichtung durch einen Spiegel (Scanner) abgelenkt.

Das Laserscannersystem vereinigt die drei aufeinander abgestimmten Messsensoren GPS (Global Positioning System), Inertiales Navigationssystem (INS) und Laserdistanzmessung zu einem komplexen Messsystem. Ein Bordcomputer steuert die Einzelkomponenten und speichert die Daten zeitsynchronisiert ab. Die dreidimensionalen Laserpunkte werden mit Hilfe von räumlichen Vektoren berechnet, deren Anfangspunkte durch GPS, deren Richtung durch INS und deren Längen durch Entfernungsmessung bestimmt werden.

Weit verbreitete Messsysteme sind die ALTM (Airborne Laser Terrain Mapper) der kanadischen Firma Optech. In der unteren linken Bildecke ist das ALTM 1225 abgebildet, mit dem die Befliegung von der TopScan GmbH durchgeführt wurde. Das System besteht aus Sensor- und Kontrolleinheit, die sich wiederum aus verschiedenen Komponenten zusammensetzen. In der Sensoreinheit sind der Laserdistanzmesser, der Ablenkspiegel und das Inertiale Naviga-

tions System (INS) integriert. Die Kontrolleinheit setzt sich aus Computer, Speicher sowie Steuereinheiten für das Inertiale Navigations System (INS) und den Laserdistanzmesser zusammen. Ergänzt wird das System durch einen GPS-Empfänger.

In Zusammenarbeit mit Optech entwickelte TopScan das Laserscanningverfahren. Bereits seit 1993 führt die TopScan GmbH weltweit Laserscannermessungen durch und war somit eines der ersten Unternehmen, die diese Technik kommerziell angeboten haben. Seit 1993 hat die TopScan GmbH allein in Deutschland mehr als 100 km<sup>2</sup> aufgenommen und ausgewertet.

Erweitert wird das Leistungsspektrum der TopScan GmbH durch den Verkauf des terrestrischen Laserscanners ILRIS-3D. Dieser ermöglicht die Vermessung und Visualisierung von komplexen Strukturen und Bereichen, von Kleinformen bis hin zu ganzen Landschaftsausschnitten, vom Boden aus.

Dipl.-Geogr. CHRISTIAN WEVER,  
TopScan GmbH  
Duesterbergstr. 5, 48432 Rheine  
Tel.: +49-5971-94803 0, Fax: +49-5971-94803 99, e-mail: info@topscan.de  
www.topscan.de

## Neuerscheinungen

JOSEF STROBL (Hrsg.), 2003: geoGovernment. Öffentliche Geoinformations-Dienste zwischen Kommune und Europa. 147 S., kartoniert, Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG, Heidelberg. <http://www.huethig.de>, ISBN 3-87907-405-4. € 40,-

WILFRIED LINDER, (2003): Digital Photogrammetry – Theory and Applications. 44 Fig., CD-Rom and 3D Glasses, 189 S., kartoniert, Springer-Verlag, PF 105280, 69042 Heidelberg, ISBN 3-540-00810-1, € 69,95

PHILIPP HIRTZ, (2003): A Framework to Interactively Compose Realistic 3D Landscapes

pe Visualizations. Remote Sensing Series, Vol. 39. CD-ROM; Remote Sensing Laboratories, Department of Geography, University of Zurich.

EUGENE A. SHARKOV, (2003): Passive Microwave remote Sensing of the Earth – Physical Foundations. XXVI, 613 p., Hardcover. Springer-Verlag, PF 105280, 69042 Heidelberg, ISBN 3-540-43946-3, € 169,95

WOLFGANG KRESSE & KIAN FADAIE, (2004): ISO Standards for Geographic Information. 137 figs, 26 tabs., XII, 322 p., Hardcover. Springer-Verlag, PF 105280, 69042 Heidelberg, ISBN 3-540-20130-0, € 89,95