

PRG

Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation

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

Jahrgang 2011, Heft 3

Hauptschriftleiter:
Prof. Dr.-Ing. Helmut Mayer

Schriftleiter:
Prof. Dr. rer.nat. Carsten Jürgens, Prof. Dipl.-Ing. Thomas P. Kersten,
Prof. Dr. rer.nat. Lutz Plümer und Dr.-Ing. Eckhardt Seyfert

Redaktionsbeirat (Editorial Board): Clement Atzberger, Andrew Frank,
Christian Heipke, Joachim Hill, Patrick Hostert, Hans-Gerd Maas, Wolfgang
Reinhardt, Franz Rottensteiner, Jochen Schiewe



E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung
(Nägele u. Obermiller) Stuttgart 2011



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.



Herausgeber:

© 2011 Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V.
Präsidentin: Prof. Dr. Cornelia Gläßer, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften, Von-Seckendorff-Platz 4, D-06120 Halle, Tel.: +49(0)345 55-26020
Geschäftsstelle: Dr. Klaus-Ulrich Komp, c/o EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH, Oststraße 2-18, D-48145 Münster, e-mail: klaus.komp@eftas.com

Published by:

E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Johannesstraße 3A,
D-70176 Stuttgart. Tel.: 0711 351456-0, Fax: 0711 351456-99, e-mail: 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

Science Citation Index Expanded (also known as SciSearch®) Journal Citation Reports/Science Edition
Hauptschriftleiter: Prof. Dr.-Ing. Helmut Mayer, Institut für Angewandte Informatik, Universität der Bundeswehr München, D-85577 Neubiberg, e-mail: Helmut.Mayer@unibw.de
Schriftleiter: Prof. Dr. rer.nat. Carsten Jürgens, Ruhr-Universität Bochum, Geographisches Institut, Gebäude NA 7/133, D-44780 Bochum, e-mail: carsten.juergens@rub.de, Prof. Dipl.-Ing. Thomas P. Kersten, HafenCity Universität Hamburg, Department Geomatik, Hebebrandstr.1, D-22297 Hamburg, e-mail: thomas.kersten@hcu-hamburg.de, Prof. Dr. rer.nat. Lutz Plümer, Universität Bonn, Institut für Geodäsie und Geoinformation, Meckenheimer Allee 172, D-53115 Bonn, e-mail: Lutz.Plumer@ikg.uni-bonn.de und Dr.-Ing. Eckhardt Seyfert, Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg, Heinrich-Mann-Allee 107, D-14473 Potsdam, e-mail: eckhardt.seyfert@geobasis-bb.de

Erscheinungsweise: 6 Hefte pro Jahrgang.

Bezugspreis im Abonnement: € 198,- pro Jahrgang. Mitglieder der DGPF erhalten die Zeitschrift kostenlos. Der Online-Zugang ist im regulären Subskriptionspreis enthalten.

Anzeigenverwaltung: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Johannesstraße 3A, D-70176 Stuttgart, Tel.: 0711 351456-0; Fax: 0711 351456-99.
e-mail: mail@schweizerbart.de, Internet: <http://www.schweizerbart.de>

Bernhard Harzer Verlag GmbH, Westmarkstraße 59/59a, D-76227 Karlsruhe, Tel.: 0721 944020, Fax: 0721 9440230, e-mail: Info@harzer.de, Internet: www.harzer.de

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

PFG – Jahrgang 2011, Heft 3

Inhaltsverzeichnis

Originalbeiträge

RUTZINGER, M., HÖFLE, B., OUDE ELBERINK, S. & VOSSELMAN, G.: Feasibility of Facade Footprint Extraction from Mobile Laser Scanning Data	97
FRICK, A., STEFFENHAGEN, P., ZERBE, S., TIMMERMANN, T. & SCHULZ, K.: Monitoring of the Vegetation Composition in Rewetted Peatland with Iterative Decision Tree Classification of Satellite Imagery	109
SAMADZADEGAN, F. & DADRAS JAVAN, F.: New Object Level Strategy for Image Fusion Quality Assessment of High Resolution Satellite Imagery	123
WOLF, N.: Feature Evaluation for a Transferable Approach of Object-based Land Cover Classification Based on Ikonos and QuickBird Satellite Data	135
RICHTER, R. & DÖLLNER, J.: Integrierte Echtzeit-Visualisierung von massiven 3D-Punktwolken und georeferenzierten Texturdaten	145

Aus Wissenschaft und Technik

KELLER, F., SÄNGER, J., KERSTEN, T. & SCHIEWE, J.: Historisches 4D-Stadtmodell der Freien und Hansestadt Hamburg – Automatisierte Generierung und Darstellung innerhalb der Google Earth Engine	155
---	-----

Berichte und Mitteilungen

Berichte von Veranstaltungen

ISPRS Kommission IV Symposium: „Geospatial Data and Geovisualisation: Environment, Security, and Society“ vom 15.–19. November 2010 in Orlando, USA	171
TLS 2010 – Terrestrisches Laserscanning mit TLS Challenge vom 6.–7. Dezember in Fulda	172
Range-Imaging Sensors and Applications Workshop (RISA) vom 26.–27. Januar 2011 in Trient, Italien	174
10. Oldenburger 3D-Tage vom 1.–3. Februar 2011	174
Fachtagung Mobile Mapping 2011 am 16. Februar 2011 in MuttENZ, Schweiz	181
3D-ARCH vom 1.–5. März 2011 in Trient, Italien	183

Mitteilungen

TU München bescheinigt Äquivalenz mit Master und verleiht wieder erste Diplomingenieur-Urkunden	184
---	-----

Hochschulnachrichten

Technische Universität Wien, Dissertation VAHID NAEIMI	185
Technische Universität Wien, Dissertation CARSTEN PATHE	186
Technische Universität Wien, Dissertation ZOLTAN BARTALIS	187
Technische Universität Wien, Dissertation RADEN HARI GINARDI	188
Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation MIRIAM HOMMEL	189
Universität Stuttgart, Dissertation SUSANNE BECKER	190

Buchbesprechung

KOHLSTOCK, P. (Kartographie)	191
------------------------------------	-----

Veranstaltungskalender	192
------------------------------	-----

Neuerscheinungen	193
------------------------	-----

Zum Titelbild	194
Korporative Mitglieder	195

Zusammenfassungen der „Originalbeiträge“ und der Beiträge „Aus Wissenschaft und Technik“
(deutsch und englisch) sind auch verfügbar unter www.dgpf.de/neu/pfg/ausgaben.htm



Feasibility of Facade Footprint Extraction from Mobile Laser Scanning Data

MARTIN RUTZINGER, Innsbruck, Austria; BERNHARD HÖFLE, Heidelberg, Germany & SANDER OUDE ELBERINK, GEORGE VOSSELMAN, Enschede, The Netherlands

Keywords: Mobile laser scanning, 3D point cloud processing, Segmentation, Facade extraction, Accuracy

Summary: Terrestrial laser scanning provides valuable information for building outlining, facade detection and building reconstruction. Especially mobile laser scanning (MLS) is considered as well suited to collect 3D point clouds from building facades along road corridors for large areas. However, the completeness of facade representation in MLS has to be investigated in order to be able to draw conclusions about the usability of this kind of data sets for further applications such as building facade modelling. We investigate the detection rates of a fully automatic point cloud processing method for extracting building facades from MLS. The point cloud is segmented into planar regions, from which vertical structures are extracted. The detection rate is assessed by comparing the detected facade footprints with visible building outlines extracted from a digital cadastre map. The completeness of the extraction is investigated regarding the facade structure, length and the distance of the facades to the vehicle trajectory. It was found that the representation of facades extracted from MLS and the cadastral map might differ if very short facade parts (< 2 m) representing jutties are present on the ground level floor. This leads to an underestimation of completeness. Moreover, it can be shown that there is a direct relationship between further characteristics, e. g. that long facades and facades near to the vehicle are more likely to be detected than others. Facades with a length between 10 m and 20 m reach a completeness of 74%. Most facades are found in a distance of 10–20 m from the vehicle where the completeness ranges from 71% to 50%. The low completeness can be explained by occlusions from moving objects and vegetation, the facade structure, orientation and its complexity. The comparison with digital cadastral data shows that MLS is not that well suited for the detection of building facades as one might expect.

Zusammenfassung: Möglichkeiten der Extraktion von Fassadengrundlinien aus mobilen Laserscannerdaten. Terrestrisches Laserscanning liefert wertvolle Informationen für die Abgrenzung und Detektion von Gebäuden und Fassaden. Insbesondere Mobiles Laserscanning (MLS) eignet sich zur großflächigen Erfassung von 3D Punktwolken von Gebäudefassaden entlang von Straßenzügen. Es bedarf jedoch der Untersuchung der Vollständigkeit der Fassadenrepräsentation in MLS-Daten, um Aussagen über die Verwendbarkeit dieser Art von Datensätzen in Anwendungen wie zum Beispiel Gebäudefassadenmodellierung treffen zu können. Wir untersuchen die Detektionsraten einer vollautomatischen Punktwolkenprozessierungsmethode für die Extraktion von Gebäudefassaden aus MLS-Daten. Die Punktwolke wird in ebene Einheiten segmentiert, von denen alle vertikalen Strukturen extrahiert werden. Die Detektionsraten werden analysiert, indem die detektierten Fassaden mit sichtbaren Gebäudeumrissen, die von einer digitalen Katastralmappe extrahiert wurden, verglichen werden. Die Vollständigkeit der Extraktionsmethode wird betreffend der Fassadenstruktur, Länge und Distanz zwischen Fassade und MLS-Fahrzeug untersucht. Fassaden unterscheiden sich in beiden Datensätzen vor allem dann, wenn sehr kurze (< 2 m) Fassadenteile vorhanden sind, die zum Beispiel Erker repräsentieren. Dies führt zu einer Unterschätzung der Vollständigkeit. Darüber hinaus kann gezeigt werden, dass ein direkter Zusammenhang zwischen weiteren Charakteristiken besteht. Insbesondere lange Fassaden und Fassaden nahe dem MLS-Fahrzeug erreichen höhere Vollständigkeitsraten als kurze und weiter entfernte. Fassaden mit einer Länge zwischen 10 m und 20 m erreichen eine Vollständigkeit von 74%. Die meisten Fassaden werden in einer Distanz von 10–20 m zum MLS-Fahrzeug mit einer Vollständigkeit von 71% bis 50% detektiert. Die geringe Vollständigkeit kann durch Abschattungseffekte von bewegten Objekten, Vegetation und durch die Fassadenstruktur,

-ausrichtung und ihrer Komplexität erklärt werden. Der Vergleich mit der digitalen Katastralmappe zeigt, dass MLS nicht in jenem Ausmaß für die Detektion von Gebäudefassaden geeignet ist, als man in einem ersten Blick erwarten würde.

1 Introduction

Today laser scanning point clouds are acquired among many others for purposes of map updating, 3D building reconstruction, and 3D city modelling. Recently mobile laser scanning (MLS) data is collected especially in urban areas and along road corridors. On the one hand laser scanning is more expensive than 3D reconstruction from images. On the other hand laser acquisitions can be conducted in night time, where less traffic and people disturb the scene. 3D data can be also collected for homogeneous facades with little or no texture where photogrammetric reconstruction approaches would have difficulties. An advantage of terrestrial laser scanning (TLS) in comparison to aerial acquisition methods of photogrammetry and airborne laser scanning (ALS) is that the position of vertical facades is represented directly by echoes reflected on building walls and does not contain roof overhangs. This makes the data set also usable for map updating purposes (in the case of MLS only for those parts, which are visible from the road side). However, due to varying point densities, different viewing positions, scan geometry, and occluding objects, the completeness of the building facades might deviate from user's expectations.

The objective of this paper is the quantitative comparison of extracted building facades from MLS in order to investigate how complete the building facade representation in these data sets is. This might have implications to the potential usability and applications of such data. The ground lines of building facades projected in to the XY plane are extracted automatically from MLS point clouds and are quantitatively compared to the ones from ground plans. The developed workflow is tested within a case study using MLS data from Enschede, The Netherlands.

The article is structured into a section presenting the related work on current segmentation methods for efficient segmentation of planar surfaces, MLS applications, and contributions to facade and building reconstruction from dense laser scanning point clouds (Section 2). In Section 3 the method for segmentation and facade extraction is presented. The data sets and the test site are described in Section 4. Finally, the results are discussed (Section 5) and a conclusion is given in Section 6.

2 Related Work

Automatic feature extraction from high density laser scanning point clouds is still an unsolved research problem. Several methods were presented for efficient range data processing to extract planar features such as building roofs and facades. An overview of segmentation techniques can be found in VOSSELMAN et al. (2004) and VOSSELMAN & KLEIN (2010). In the following, methods working either in 2D range images, voxel space or 3D point clouds are discussed. A method for extracting planar features in 2D range images from TLS was developed by GORTE (2007). The horizontal and vertical scan angle, the distance between origin and pixel and the derived image gradients are used to assign every pixel to a plane. Finally, the pixels are assigned to planar segments using a region growing segmentation. The algorithm works efficiently in the image domain and is straightforward to implement, but cannot be applied to 3D point clouds of overlapping TLS scenes. SCHMITT & VÖGTLE (2009) present a voxel-based approach to derive planar patches from TLS data. The 3D point cloud is converted into voxel space. For each voxel centre the normal vector is calculated. Analysing the deviation of the normal direction among adjacent voxels, planar sur-

faces are extracted where the angle difference is below a certain value. The highest accuracy of the laser measurements is maintained, if features are extracted directly from the recorded echoes i. e. from the 3D point cloud. Also in this domain the normal vectors can be used to find planar regions e. g. by estimating the normal using a TIN neighbourhood or a KD-tree (RABBANI et al. 2006, JOCHEM et al. 2009). FILIN & PFEIFER (2006) present a point cloud based approach for planar surface segmentation applying clustering in feature space. Neighbouring points are selected using slope adaptive neighbourhood. Planar segments are then separated e. g. by clustering point attributes such as the X- and Y-component of the normal vector. The segmentation used in this study defines planarity for seed point selection in Hough space (VOSSELMAN & DIJKMAN 2001, VOSSELMAN & KLEIN 2010). The advantage of this method is (i) the relatively robustness against noise and (ii) it works also on data sets with inhomogeneous point distributions and data sets containing gaps. The method is explained in detail in the Section 3.

MLS is a rather young development in the field of laser scanning. Recent publications focus on the geometric quality and problems of registration of the acquired data sets (HAALA et al. 2008, BARBER et al. 2008). Only little work has been published on feature extraction so far. The focus lies on road geometry determination (YU et al. 2007, MCELHINNEY et al. 2010) and road feature extraction (BRENNER 2009, SCHWARZBACH 2009). MANANDAHAR & SHIBASAKI (2002) analyse the orientation of echoes along the scan lines separating natural objects from man-made objects, which are described by planarity or linearity. Building facades are extracted by checking the connectivity and comparing the distance to a fitted line to the points of a given scan line. The presented results look visually promising but no further error assessment was computed.

The detection of building outlines from ALS or aerial imagery is hampered by the fact that the building outlines in these data sets are defined by the roof extension and not by the building walls as in the cadastral maps. Furthermore, cadastral maps are often partly surveyed by terrestrial measurements and partly updated by photogrammetry including the

roof overhangs. This limits the comparability of cadastral data and data sets from automatic detection approaches (ROTTENSTEINER et al. 2007), in change detection analysis using cadastral maps and laser scanning data (VOSSELMAN et al. 2005, MATIKAINEN et al. 2010), and in automatic building reconstruction procedures (OUDE ELBERINK & VOSSELMAN 2009). A comprehensive discussion on how to describe the quality of detected building footprints is given by RUTZINGER et al. (2009a). These shortcomings are not apparent, if data sets are used, which represent building walls at their actual position. RUTZINGER et al. (2009b) investigated the completeness of building outlines extracted from ALS and MLS at a sample where overlapping data was available. For instance, dense ALS data contain echoes from building wall points, which might be used to complete cadastral information. However, it has been shown that the representation of echoes on walls in ALS point clouds strongly depends on the flight settings, so that the full building outline might be extractable only for specific cases. Extracted facades from TLS and MLS represent building walls at their “true” position. For example, PU & VOSSELMAN (2009) extract building facades and model 3D buildings using TLS data.

Concluding the related work, out of the range data segmentation algorithms published, methods are favoured, which have been shown to work efficiently and reliable in the original 3D point cloud maintaining the high precision and accuracy of the laser scanning measurements. The precision of MLS has been investigated and first applications have shown that MLS is well suited for reconstruction purposes. However, the appearance of objects such as building facades in MLS data is influenced by the relative position of the scanner to the object and by occlusion effects caused e. g. by vegetation or temporary objects such as cars, which requires further investigation and quantification.

3 Method

The workflow consists of a segmentation step to detect planar areas and a classification step to select vertical segments. The extracted

building facades are then converted to building facade ground lines projected into the XY plane in order to compare them to the cadastre and the potentially visible building outlines modelled for the MLS campaign. In the following these extracted lines are called facade lines.

3.1 Segmentation

The point cloud is segmented into planar regions using surface growing segmentation with a 3D Hough transform for seed detection (VOSSELMAN & KLEIN 2010). From the set of points without a segment label an arbitrary point is selected. All points within a certain neighbourhood from the selected point are transformed into planes in the Hough space. If a bin in the Hough space contains votes from a minimum number of points, these points constitute a seed surface and initial plane parameters are obtained from a least squares fit. Further points are added to the seed surface if they fulfil the following criteria for surface growing. The points added have to be in a certain radius around the surface and must lie within a certain distance to the plane. After adding points the plane parameters are re-estimated. If a point becomes part of the segment it cannot be a seed point any more. Further points are added to the segment until the defined limits are exceeded. Then the point cloud is searched for a new seed surface to start the growing procedure for further segments. Points which do not fulfil the segmentation criteria remain unsegmented.

3.2 Classification

In a second step the normal vector is estimated for each segment. The inner product of the normal vector with the vertical axis is then compared to an angle threshold in order to select only vertical segments. Non-vertical segments and unsegmented points are removed. Also small segments, which fall below a certain number of points are deleted. For the vertical segments the facade line representing the ground line of the building facade projected to the XY-plane and its 2D length are used for the error assessment.

3.3 Comparison of Wall Points and Detection Rates

The possibilities to assess detection rates are manifold. Since only building facades, which are potentially visible from the laser sensor can be extracted from the MLS data, only these are considered as reference in order to investigate the detection success of the proposed method. Visibility is calculated from the MLS GPS trajectory and the cadastral map in order to exclude shadow effects from other buildings. In a second step the selection of visible reference facades is refined by only considering the actual surveyed area as derived from a point density map (1 m resolution). For this comparison the binary representation including areas with number of echoes >1 is generated from a point density map. Then the selection of visible building facades is refined for this area. The detection rate is calculated by computing completeness using two different measures, which are (i) counting and comparing the number of corresponding facades and (ii) measuring and comparing the 2D lengths of facade lines (Fig. 1).

Completeness is defined by the number of true positives (TP) divided by the sum of TP and false negatives (FN). TP are the correct matches i. e. facade lines of the reference corresponding to the facade lines extracted from the laser data. A FN is a facade line contained in the reference but missing in the laser data. In a first step corresponding extracted and reference facade lines have to be found. Correspondence is defined by (i) minimum distance and (ii) angle between extracted building facade and reference facade. The distance threshold accounts for errors caused by differences of object representation in the MLS and the digital cadastral map as well as registration errors. The angle threshold is used to check the similarity in orientation of the lines. In a second step, two different types of TPs for error assessment are defined. Firstly, the corresponding objects, i. e. fulfilling the distance and angle threshold are counted as TP objects. Secondly, in order to be able to give a more detailed description of the correctly detected facade parts, the correctly detected reference facade length [m] has to be considered and

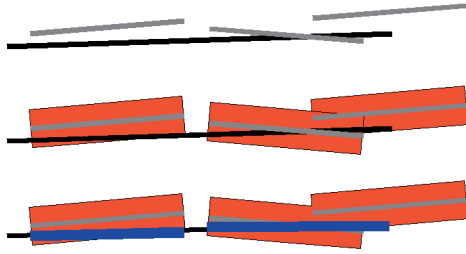


Fig. 1: Definition of correct matches (true positive length) by overlay of extracted facade lines (grey) with the reference facade lines (black), the visualised rectangle representing the minimum distance (red) and the selected reference facade line as true positive (blue).

summed up for the error assessment (Fig. 1). The extracted and reference facade lines might not have the same length or a reference facade is represented by multiple extracted facades. The correctly detected parts of the reference line (i. e. TP line parts) are derived by expanding the extracted facade line orthogonally by the distance threshold defined above, which leads to a polygon (i. e. rectangle) (Fig. 1). If multiple extracted facades correspond to one reference facade line, the generated polygons are first merged, which causes a merging of the geometries if rectangles overlap. The resulting polygons, or single polygon in case of only one extracted line, are then intersected with the reference line and the TP length can be easily obtained by the sum of line parts covered by polygons.

Tests on intervals of length and distance are only applied to the reference (digital cadastral map), while the detected facades are all maintained for potential TP selection. This restricts the further detection rate tests to the comparison of completeness. Moreover, only the potential ability to detect facades is investigated, not a classification of building facades. Therefore, the overestimation of detection is not further investigated as well.

4 Data Sets and Test Site

The MLS data were acquired in leaf-off season using the Optech Inc. Lynx Mobile Mapper. The system has two sensors mounted on the back of the car, which are deflected by two 360

degree rotating mirrors. The sensors scan in two nearly vertical planes perpendicular to each other and both under an angle of 45 degrees with the driving direction. This configuration aims to obtain an optimal visibility of objects and limit effects of occlusion. Each sensor has a scan rate of 150 Hz and a pulse repetition frequency of 100 kHz. The maximum range is specified as 100 m at a 20% reflecting target achieving a range precision of 0.7 cm. The absolute GPS accuracy is defined by 5 cm (OPTECH INC. 2008). As reference data the building polygons of the official digital cadastral map of the city of Enschede were used.

The test site is a 9 km long track located in the city of Enschede, The Netherlands. The area was defined by buffering the MLS GPS track with a width of 100 m. This corresponds to the specified maximum range of the Optech Inc. Lynx MLS system (OPTECH INC. 2008). For this area 927 buildings were extracted from the digital cadastral map. The area comprises one and two storey family houses surrounded by high deciduous trees in the north west of the test site. In the south and east there are also multi-storey buildings and large building blocks. The test site contains a large variety of facade types such as large planar facades from public and industrial buildings and small structured facades with jutties and shutters from family houses. The road width varies between 20 m and more than 50 m at road crossings, which influences the distance from the MLS sensors to the building facades. Ground elevation changes are only marginal and range from 32.8 m to 42.0 m.

5 Results

Segmentation of planar areas was performed using surface growing, which is based on seed point selection in Hough space and a subsequent plane re-adjustment using least square fitting. The parameters were selected after extensive testing on sample facades. For seed point selection and growing a distance to plane criteria of 0.2 m were applied. The bin size in Hough space was set to 3.0° for the slope angle and 0.2 m for the distance. Neighbouring points were selected with a 3D search radius of 0.5 m.

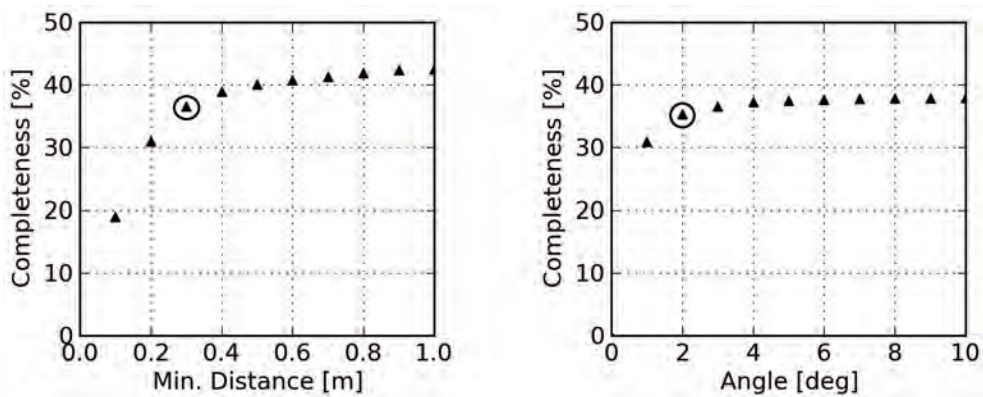


Fig. 2: Estimation of optimal settings for the assessment of the detection rate (marked by a circle). Left: Definition of true positives (TP) by comparing the distance of extracted facade lines to the reference facade lines (< 0.3 m). Right: the angle between the normal vectors (< 2 degrees).

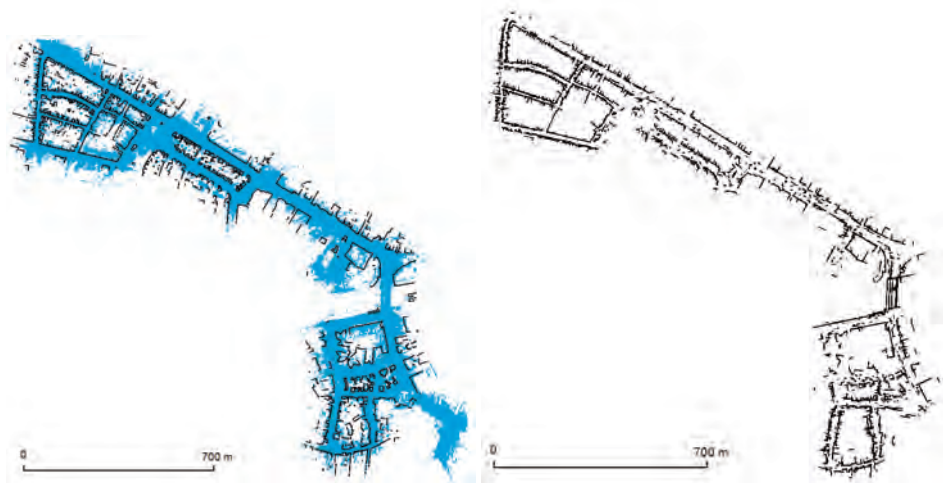


Fig. 3: Building outlines and building facades represented in different data sets. Left: visible digital cadastral map (black lines) with area covered by mobile laser scanning point cloud (blue area). Right: facades extracted from mobile laser scanning data.

A pair of correctly matched facades from MLS and reference (TP) has to meet a certain angle criterion between both ground lines and the extracted MLS facade has to be within a defined distance to the reference facades. These two parameters have to be below a certain value. Fig. 2 shows the tests on the distance and angle criterion. On the one hand the optimal threshold values for distance and angle should be most strict and on the other hand they should not underestimate the detection. The optimal values are found when the curve

starts approximating the marginal error value. Hence, the distance is set to 0.3 m and the angle is set to 2 degrees, which results in a completeness of 37% (TP = 7,841 m, FN = 13,620 m). If the number of objects is compared and TP is defined as correct correspondence defined by minimum distance and angle (cf. Section 5.3) the detection rate drops to a completeness of 28% (TP = 1906, FN = 4969). The difference between the two completeness measures is explained by the dominating influence of long walls in the first measure.

The extracted facade lines are compared to facade lines from the digital cadastral map, which are visible from the MLS GPS trajectory. The visibility was calculated between GPS trajectory and digital cadastral map within a range of 100 m, which is the maximum range specified by the data provider. The visible facades were then cropped by the area derived from a point density map, which contain at least one echo (Fig. 3a).

The visual impression of the results is rather positive (Fig. 3). The occurrence of false positives originates from planar vertical segments found at cars and in trees. However, the further analysis focus on true positives and false negatives since the completeness of building facades is of major interest in this study. The low detection rates suggest (Fig. 2) that MLS might not work well for facade extraction. Therefore, it is necessary to investigate the influencing factors on the detection rate in detail. This is done by the selection of two sub

areas where the completeness was calculated once only for the road parallel facade parts and once for all facade parts. The reduction in completeness from parallel facades to all facade parts ranges from 5 to 10% (Tab. 1). This shows that the orientation of the facades is not the main factor leading to low completeness. However, the significant difference in completeness is obvious between the two sub-areas. The first sub-area contains planar facades only (Fig. 4, left), while the second sub-area contains buildings with more structured facades i. e. jutties on the ground floor (Fig. 4, right). These small structural parts are also mapped in the digital cadastral map representing the building outline on the ground. While the main walls were extracted correctly from the MLS data, the small structures are often not detected, which leads to a lower completeness in such cases.

In the next step the detection rates for the whole test area are analysed considering the

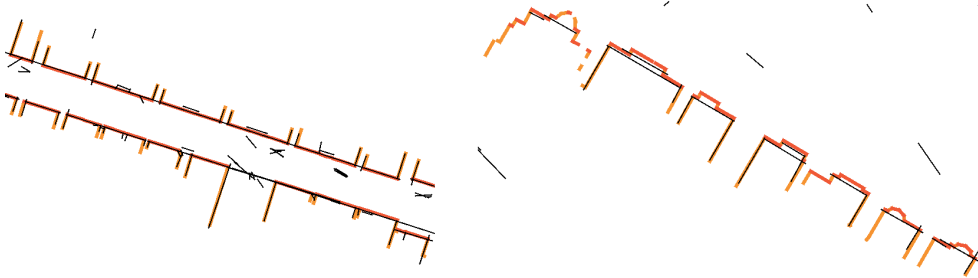


Fig. 4: Extracted building facades from mobile laser scanning (black) compared to the visible facades in the digital cadastral map composed by road parallel facades (red) and perpendicular facades (orange). The first sub-area contains buildings, which have only planar facades (left). The second sub-area contains facades with jutties (right).

Tab. 1: Completeness for the extracted facade lines in Enschede and two selected sub-areas investigating all facade parts and only facade parts, which are parallel to the MLS vehicle.

Test site	TP _{obj}	FN _{obj}	Comp _{obj} [%]	TP _{len} [m]	FN _{len} [m]	Comp _{len} [%]
Enschede test site	1,906	4,969	28	7,841	13,620	37
Sub-area 1 (parallel)	55	4	93	244	22	92
Sub-area 1 (all)	101	17	86	433	79	85
Sub-area 2 (parallel)	14	25	36	21	50	30
Sub-area 2 (all)	25	78	24	75	135	36

facade length and the distance of facades to the laser scanner. Further influences on the detection rate are the occlusion of facades by other objects, which is more likely to happen if the distance to the MLS vehicle is larger. On the other hand larger facades might be easier detectable whereas small areas might be more likely occluded.

The effects of the reference facade line length (Fig. 5) and the distance of the facade to the GPS trajectory (Fig. 6) on the detection rate results are analysed for different intervals. Fig. 5 gives a more detailed insight into the facade lines with a length from 0–100 m whereas facade lines from 1–10 m are analyzed in 1 m length intervals. The comparison of fa-

cade lengths in the range of 0–10 m shows that completeness increases with increasing facade length. This can be explained by differences in the representation of facades in the digital cadastral map and the laser data. For example, there are small jutties, which are included in the digital cadastral map but not apparent in the MLS point cloud. In the interval investigated the completeness is better than 60% for facades longer than 5 m. These are the facades which give the substantial shape to the building. The number of small segments (< 3 m) is rather high. These are often points of sub structures, connections between edges or parts of irregular facades. Small reference facades also occur on building walls which are

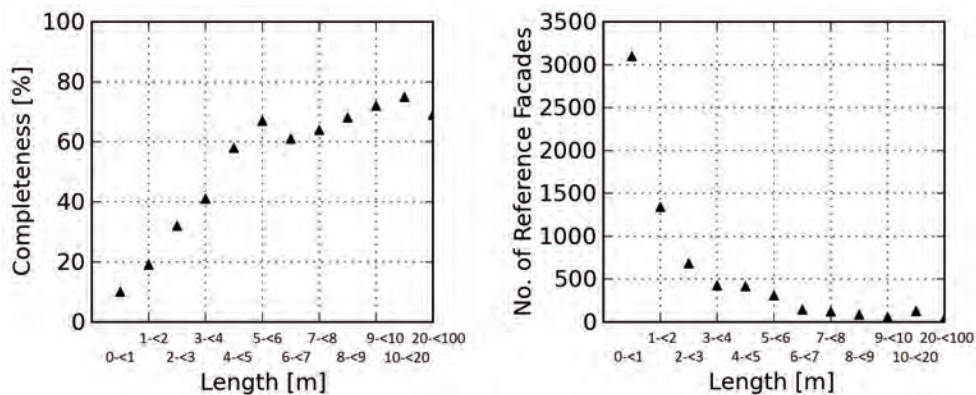


Fig. 5: Completeness (left) and number of reference facades (right) for facade length intervals from 0–< 10 m in 1 m steps, 10–< 20 m, and 20–< 100 m.

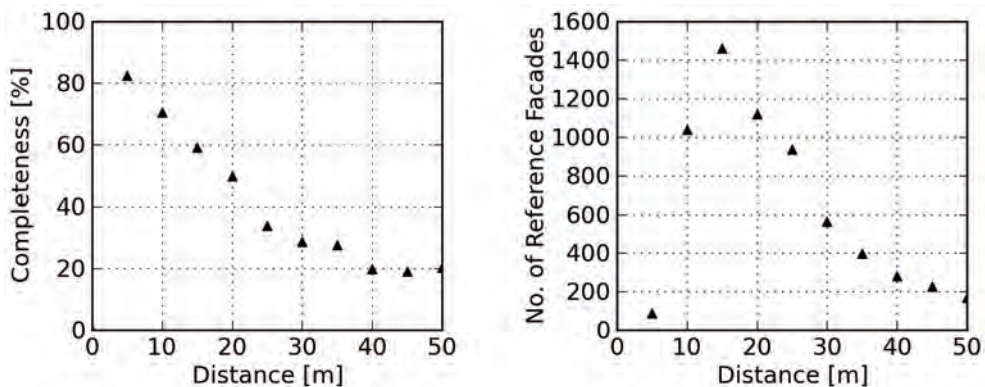


Fig. 6: Completeness and number of references for distance intervals of facade to trajectory from 0 m to 50 m in 5 m steps.

located farther away from the trajectory (i. e. located at the backside of buildings). Moreover, the facades in Fig. 5 include also those, which are relatively far away from the sensor containing only a low number of reflected echoes, which generally lowers the detection rate. Facades with a line length between 10 m and 20 m reach a completeness of 74% (128 reference facades). Facade lines, which are longer than 20 m and shorter than 100 m, reach 69% (38 reference facades). The number of facades decreases by increasing length. In spite of this, a clear relationship namely increasing completeness by increasing facade line length is evident.

The investigation of the distance to the GPS trajectory (Fig. 6) shows decreasing completeness for increasing distance. On the one hand this is related to the difficulty of detecting vertical segments which are occluded by other objects such as trees or cars. On the other hand the decreasing point density makes it more difficult to detect facades in larger distance. The MLS data contains vertical walls until a distance of 80 m. About 53% of the reference facades occur in a distance interval of 10–20 m – where the completeness ranges from 71% to 50%. Generally speaking a decreasing completeness with increasing distance to the sensor can be seen.

6 Conclusion

MLS is a novel laser scanning technique, which is of interest for automatic building facade detection (Fig. 7) and provides valuable information for 3D building facade modelling. The method presented is fully automated and allows the extraction of building facades for large areas. A detailed error assessment helps



Fig. 7: Extracted laser echoes of facade segments from mobile laser scanning coloured by segment.

to investigate the properties of the extraction results and their usefulness for further applications. However, the comparison between facade lines extracted from MLS and a digital cadastral map is difficult to make since MLS extracts tentatively the large and dominate facade parts while the cadastral map only contains the outline of building walls, which often includes jutties from the ground floor.

In general the completeness of building facades is lower than one might expect, which limits its applicability for building reconstruction. It can be shown that there is a relationship between completeness and the distance to the vehicle trajectory since facades with a large distance more likely suffer from occlusion. The same holds for facade length. Small facade parts are more difficult to detect or are not part of the detection because of different facade representation in the digital cadastral map and the MLS point cloud.

Care has to be taken in acquisition planning that a data collection in leaf-on season might further decrease the reflections on building facades behind deciduous plants and therefore lower the detection rate. A further restriction of MLS is that it is only possible to survey building facades, which are facing accessible roads. However, automatic facade extraction can be used to provide data for applications, which only need this kind of building representation such as 3D street view modelling and traffic related analysis.

The presented study simplifies the 3D extent and shape of facades to a 2D line, which can be compared to commonly available 2D cadastral data. Future work should investigate facade representation in 3D by comparing MLS facade point clouds to independently generated 3D building reference models. Further work is necessary to evaluate systematically different MLS systems in terms of accuracy and completeness in order to be able to recommend strategies for operational extraction of building facades. In near future MLS point clouds will be acquired area-wide for urban environments and will serve as input in operational 3D city modelling of street views. Comprehensive knowledge on quality is required in order to be able to assess the potential of MLS point clouds for such applications.

Acknowledgements

The authors want to thank the company Top-Scan GmbH for acquiring the mobile laser scanner data of Enschede, The Netherlands.

References

- BRENNER, C., 2009: Extraction of features from mobile laser scanning data for future driver assistance systems. – *Advances in GIScience, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*: 25–42; Springer.
- BARBER, D., MILLS, J. & SMITH-VOYSEY, S., 2008: Geometric validation of a ground-based mobile laser scanning system. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **63** (1): 128–141.
- FILIN, S. & PFEIFER, N., 2006: Segmentation of airborne laser scanning data using a slope adaptive neighborhood. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **71** (6): 743–755.
- GORTE, B., 2007: Planar feature extraction in terrestrial laser scans using gradient based range image segmentation. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **36** (3/W52): 173–177.
- HAALA, N., PETER, M., CEFALU, A. & KREMER, J., 2008: Mobile Lidar Mapping for Urban Data Capture. – *VSSM 2008, Digital Heritage – 14th International Conference on Virtual Systems and Multimedia*: 95–100.
- JOCHER, A., HÖFLE, B., RUTZINGER, M. & PFEIFER, N., 2009: Automatic roof plane detection and analysis in airborne lidar point clouds for solar potential assessment. – *Sensors* **9**: 5241–5262.
- MCELHINNEY, C., KUMAR, P., CAHALANE, C. & MCCARTHY, T., 2010: Initial results from European road safety inspection (eursi) mobile mapping project. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **38** (5/ICWG 5/1): 440–445.
- MANANDAHAR, D. & SHIBASAKI, R., 2002: Auto-extraction of urban features from vehicle-borne laser data. – *Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, digital media*.
- MATIKAINEN, L., HYYPPÄ, J., AHOKAS, E., MARKELIN, L. & KAARTINEN, H., 2010: Automatic Detection of Buildings and Changes in Buildings for Updating of Maps. – *Remote Sensing* **2** (5): 1217–1248.
- OPTTECH INC., 2008: LYNX Mobile Mapper Data Sheet. www.opttech.ca/pdf/LynxDataSheet.pdf (March 2, 2011).
- OUDE ELBERINK, S. & VOSSELMAN, G., 2009: Building Reconstruction by Target Based Graph Matching on Incomplete Laser Data: Analysis and Limitations. – *Sensors* **9** (8): 6101–6118.
- PU, S. & VOSSELMAN, G., 2009: Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **64** (6): 575–584.
- RABBANI, T., HEUVEL, F. & VOSSELMAN, G., 2006: Segmentation of point clouds using smoothness constraints. – *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **36**: 248–253.
- ROTTENSTEINER, F., TRINDER, J., CLODE, S. & KUBIK, K., 2007: Building detection by fusion of airborne laser scanner data and multi-spectral images: Performance evaluation and sensitivity analysis. – *ISPRS Journal for Photogrammetry and Remote Sensing* **62** (2): 135–149.
- RUTZINGER, M., ROTTENSTEINER, F. & PFEIFER, N., 2009A: A Comparison of Evaluation Techniques for Building Extraction from Airborne Laser Scanning. – *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* **2** (1): 11–20.
- RUTZINGER, M., OUDE ELBERINK, S., PU, S. & VOSSELMAN, G., 2009B: Automatic extraction of vertical walls from mobile and airborne laser scanning data. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **38** (3/W8): 7–11.
- SCHMITT, A. & VÖGTLE, T., 2009: An advanced approach for automatic extraction of planar surfaces and their topology from point clouds. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **1**: 43–52.
- SCHWARZBACH, F., 2009: Suitability of different LiDAR data sets for 3D mapping of the road environment. – *PFG Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **2**: 117–127.
- VOSSELMAN, G. & DIJKMAN, S., 2001: 3D building model reconstruction from point clouds and ground plans. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **34** (3/W4): 37–44.
- VOSSELMAN, G., KESSELS, P. & GORTE, B., 2005: The utilisation of airborne laser scanning for mapping. – *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **6** (3–4): 177–186.
- VOSSELMAN, G. & KLEIN, R., 2010: Visualisation and structuring of point clouds. – *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*: 43–79; Whittles Publishing
- VOSSELMAN, G., GORTE, B., SITHOLE, G. & RABBANI, T., 2004: Recognising structure in laser scan-

ning point clouds. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **46** (8/W2): 33–38.

YU, S.J., SUKUMAR, S.R., KOSCHAN, A.F., PAGE, D.L. & ABIDI, M.A., 2007: 3D reconstruction of road surfaces using an integrated multi-sensory approach. – Optics and Lasers in Engineering **45**: 808–818.

Addresses of the Authors:

Dr. MARTIN RUTZINGER, University of Twente, ITC – Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente. Now at: University of Innsbruck, Institute of Geography, Innrain 52f, 6020 Innsbruck, Austria, Tel.: +43 512 507-5428, Fax: -2895, martin.rutzinger@uibk.ac.at

Dr. BERNHARD HÖFLE, University of Heidelberg, Department of Geography, Chair of GIScience, Berliner Str. 48, 69120 Heidelberg, Germany, Phone: +49 6221 54-5594, Fax: -4996, e-mail: hoe-fle@uni-heidelberg.de

Dr. SANDER OUDE ELBERINK and Prof. GEORGE VOSSELMAN, University of Twente, ITC – Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente, P.O. Box 217, 7500 AE Enschede, The Netherlands, Phone: +31 53 487-4350, -4344, Fax: -4335, e-mail: oudeelberink@itc.nl, vosselman@itc.nl

Manuskript eingereicht: November 2010
Angenommen: März 2011



Monitoring of the Vegetation Composition in Rewetted Peatland with Iterative Decision Tree Classification of Satellite Imagery

ANNETT FRICK, Potsdam, PEGGY STEFFENHAGEN, Greifswald, STEFAN ZERBE, Bozen, Italien, TIEMO TIMMERMANN & KARSTEN SCHULZ, Greifswald

Keywords: decision trees, rewetted peatland, vegetation monitoring, carbon stock, biomass, VHR

Summary: Peatland was subject to heavy drainage and degradation throughout the world and thus is now the focus of large scale restoration attempts. The monitoring of both vegetation development and balance of matter after restoration has started is indispensable, since an important objective of peatlands rewetting is the rehabilitation of their sink function. Against this background, we investigated rewetted fens in NE Germany in order to qualitatively and quantitatively evaluate the vegetation development after restoration measures. The aim of this study was to analyse the vegetation composition with multispectral and very high spatial resolution satellite imagery. We investigated two sites with different rewetting dates and also took biomass and carbon content samples for the main plant species in order to estimate nutrient storage. We tested the applicability of various satellite sensors (QuickBird, WorldView I and SPOT) and an iterative classification scheme based on decision trees for mapping several wetland plant species (e.g. *Phragmites australis*, *Typha spp.* and *Carex spp.*) and vegetation types. We chose three different widely used decision tree classifiers for this study: AdaBoost, See5 and RandomForest. Evaluation criteria were overall accuracy and mean class accuracy. Multispectral and very high spatial resolution satellite data and the developed method allow for the identification of the most important vegetation types in rewetted fens. All applied sensors yielded good results with overall accuracies of 85% and 92%. Some classes reached lower accuracies due to different reasons (capture date, size of training set or spatial resolution of the sensor).

We found remote sensing a very valuable tool not only for the observation of the restoration success in rewetted peatland but also for the analysis of the peat accumulation potential as well as biomass and nutrient storage.

Zusammenfassung: *Monitoring der Vegetationszusammensetzung in wiedervernässten Niedermooren anhand einer iterativen decision tree Klassifikation von Satellitendaten.* Niedermoore in der ganzen Welt sind von starker Entwässerung und Degradation betroffen und stehen nunmehr im Fokus von großflächigen Renaturierungsprojekten. Das Monitoring der Vegetationsentwicklung und des Stoffhaushaltes dieser Flächen ist dabei unerlässlich, da ein wichtiges Ziel der Renaturierung die Wiederherstellung ihrer Senkenfunktion ist. Vor diesem Hintergrund haben wir wiedervernässte Niedermoorflächen im Nordosten Deutschlands untersucht. Das Ziel der Studie war es, mit Hilfe von multispektralen und räumlich höchstauflösenden Satellitendaten, qualitative und quantitative Aussagen zur Vegetationsentwicklung nach der Renaturierung zu treffen. In zwei Gebieten mit unterschiedlichen Vernässungszeitpunkten wurden Proben zu Biomasse und Kohlenstoffgehalt der dominanten Pflanzenarten genommen. Verschiedene Satellitensensoren (QuickBird, WorldView I und SPOT) wurden verwendet sowie ein iterativer Klassifikationsansatz basierend auf decision trees entwickelt, um dominante Arten (z. B. *Phragmites australis*, *Typha spp.* und *Carex spp.*) und Vegetationstypen zu klassifizieren. Drei weit verbreitete decision tree Algorithmen kamen zum Einsatz: AdaBoost, See5 und RandomForest. Die Validierung der Ergebnisse erfolgte sowohl mit Hilfe der Gesamtgenauigkeit als auch der mittleren Klassengenauigkeit. Alle verwendeten Sensoren erzielten gute Ergebnisse zwischen 85% und 92% Gesamtgenauigkeit. Einige Klassen erreichten jedoch nur geringere Werte. Dies hatte verschiedene Ursachen (Aufnahmedatum, Anzahl der Trainingsgebiete, räumliche Auflösung des Sensors). Als Fazit kann festgestellt werden, dass mit Hilfe von Satellitenfernerkundung der Renaturierungserfolg von wiedervernässten Niedermooren anhand der Vegetati-

onszusammensetzung sehr gut überwacht werden kann. Auch eine weitergehende Analyse von Torfbildungspotenzial und Biomasse- /Nährstoffspeicherung ist damit möglich.

1 Introduction

The restoration of degraded and damaged ecosystems has become a major task throughout the world (PERROW & DAVY 2002, TEMPERTON et al. 2004, VAN ANDEL & ARONSON 2006, ZERBE & WIEGLEB 2009). Particularly peatland was subject to heavy degradation and is now the focus of large scale restoration attempts. One of the crucial preconditions of successful ecosystem restoration is the monitoring of both vegetation development and balance of matter, since an important objective of peatland rewetting is the restoration of their sink function.

In NE Germany, peatland originally covered more than 10% of the total landscape (KOWATSCH 2007). Due to drainage and the intensification of land use since the 1950's, most fens were strongly altered and lost their functions and services for nutrient and water retention, water purification, and habitats for plants and animals (SUCCOW & JOOSTEN 2001, TIMMERMANN et al. 2009). In order to restore these ecosystems, the federal state of Mecklenburg-Western Pomerania initiated a 'Peatland conservation programme' in 2000 (LENSCHOW 1997). Consequently up to now, more than 10,000 hectares of fens have been rewetted. Despite investigations of such rewetted peatland on the local level (TIMMERMANN et al. 2006, GELBRECHT et al. 2008), vegetation monitoring on the regional level has not yet been carried out. However, for the federal state government and scientists it is essential to control the progress of rewetted fens, particularly the re-initialised peat accumulation under restored conditions. We tried to fill this gap by developing a method for the monitoring of rewetted peatland with the help of satellite images. As access to the fen sites is often difficult due to flooding, remote sensing is presumably a helpful means to observe the status of vegetation cover and its change due to the altered water regime.

Several studies have successfully applied hyperspectral imagery to classify wetland vegetation (e. g. BECKER et al. 2007, PENGRA et al. 2007). However for operational use hyperspectral data is often not available. Since many of the wetland plant species and vegetation forms have very similar spectral characteristics the mapping with only multispectral information is difficult. BECKER et al. (2007) found a minimum of seven spectral bands and a spatial resolution of 1 m necessary to obtain a good classification result. With only limited spectral information at hand (e. g. 4 bands with QuickBird or 3 bands with SPOT) classification accuracy can be improved by taking texture measures into account (e. g. RUIZ et al. 2004).

In this study, we tested the applicability of various satellite sensors (QuickBird, WorldView I and SPOT) and decision tree classifiers for mapping several plant species and vegetation types. Decision tree classifiers gain more and more in importance for remote sensing applications and often perform faster and with better results than traditional classification algorithms. Many applications regarding qualitative and quantitative environmental issues like land-cover mapping (FRIEDL & BRODLEY 1997, HÜTTICH et al. 2009, OTUKEI & BLASCHKE 2010), ecotope mapping (CHAN & PAELINCKX 2008), the monitoring of invasive plants (LAWRENCE et al. 2006), or the estimation of surface sealing or forest canopy (HEROLD et al. 2003) have successfully implemented tree-based classifiers such as RandomForest (BREIMAN 2001) or See5 (QUINLAN 1993). The possibility to easily integrate nominal data in the classification process is a very important asset in times of ever growing thematic geo-information and a-priori knowledge. Furthermore the non-parametric approach of tree-based classifiers can be regarded as big advantage compared to the normal distribution constraints of parametric methods.

The aim of this study was to analyse the vegetation composition of rewetted peatlands

with multispectral and very high spatial resolution satellite imagery. We investigated two sites with different rewetting dates and also took biomass and carbon content samples for the main plant species in order to estimate nutrient storage.

Since ground truth training samples are scarce for some ecologically very important classes we constructed an iterative tree-based classification scheme. We used three different decision tree classifiers and combined the classification results to create new training samples for a second classification run (Section 3.3). The intention of this study was not to directly compare the performance of the different algorithms but to benefit from their varying strengths and to establish an operational method for the monitoring of rewetted peatland.

2 Study Area and Data

2.1 Study Areas

We studied the middle and lower reaches of the Peene river and the lower reaches of the Trebel river, two large river valley systems in

NE Germany (Fig. 1). The whole landscape was formed during the Weichsel glaciation, creating moraines, sandures, river systems, and large wetland areas. The climate has a slight continental character indicated by a relatively low mean annual precipitation of 540–590 mm, a mean annual air temperature of around 8.0 °C, and a temperature range of about 18 °C.

Since the Middle Ages, these peatlands have been used as meadows and pastures (FISCHER 2005, JANSEN et al. 2009). The change to an increasingly intensive agricultural land use since the middle of the 20th century created species-poor fen grasslands with tremendous peat losses, and a subsequent sinking of the soil surface below the water level of adjacent rivers and lakes (SUCCOW & JOOSTEN 2001). After rewetting since the 1990's, the site conditions strongly changed. Depending on the degree of inundation, the mesophytic grassland has changed to a vegetation mosaic of different helophytes and hydrophytes. Thus, species like *Carex spp.*, *Glyceria maxima*, *Phalaris arundinacea*, *Phragmites australis*, and *Typha latifolia*, accompanied by submersed macrophytes form a rich vegetation mosaic as is depicted in Fig. 2 (TIMMERMANN et al. 2006, ROTH

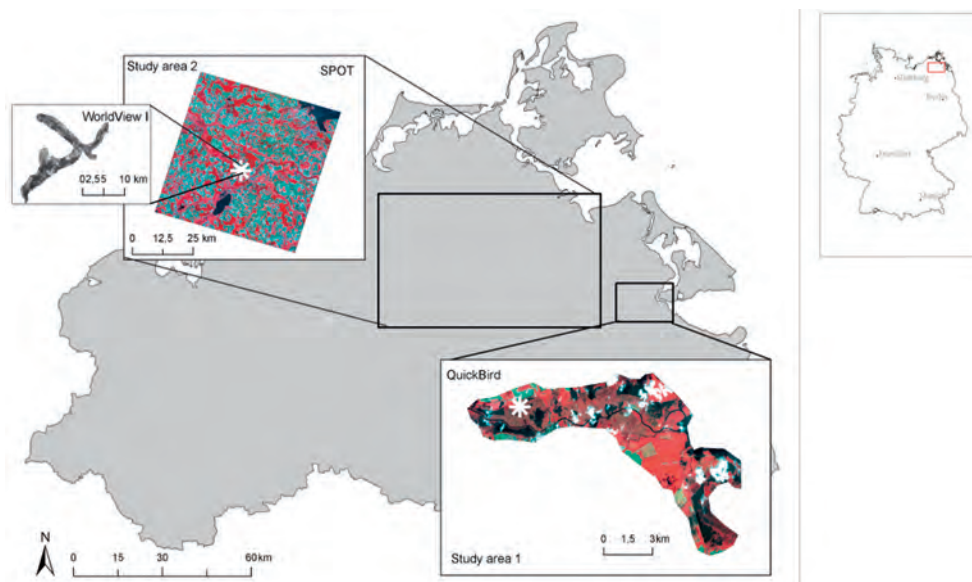


Fig. 1: Study area 1 in the lower Peene river valley and study area 2 in the lower Trebel river valley in Mecklenburg-Western Pomerania (NE Germany). The white asterisks show the location of polder Jargelin in study area 1 and polder Beestland in study area 2.



Fig. 2: View of Polder Beestland.

2000, SUCCOW 2001, STEFFENHAGEN et al. 2008). The water level depends on seasonal changes as well as on weather conditions. The highest water level is reached in winter and spring. Due to evapotranspiration processes it is lowest in summer. Nevertheless the vegetation mosaic is recognisable in the field throughout the whole year, but it is best differentiated in remote sensing data between early summer and autumn, when the water level is on its lowest.

Results from two different polders within those larger study areas will be presented in greater detail in this paper: polder Jargelin from study area 1 and polder Beestland from study area 2. The vegetation of both polders was mapped in 1995 and classified as Plan-

tagini majoris-Lolietum perennis Beger 1932 nom. invers. propos. plant community (LUNG 1994–1997, PÄTZOLT & JANSEN 2004). Polder Jargelin (33 ha) was heavily drained and served for decades as high intensity grassland. The dominating species in 1995, the year of rewetting, was *Phalaris arundinacea*. Polder Beestland (165 ha) was also drained and used as high intensity grassland with the dominating species *Phalaris arundinacea* and *Festuca arundinacea*. It was rewetted in 2002. By now, the grassland in both polders has changed to a mosaic of different helophytes and hydrophytes.

2.2 Remote Sensing Data Source

Our remote sensing database for study area 1 with polder Jargelin was QuickBird satellite imagery (Tab. 1). The order was tasked, unfortunately, clouds cover more than 10% of this study area and another 6% is strongly influenced by cloud shadow. Consequently, the radiometric characteristics of the data are quite impaired. For study area 2 with polder Beestland, we used as remote sensing database an archived SPOT scene and three archived WorldView I scenes (Tab. 1) since QuickBird tasking was not successful. Unfortunately, no WorldView summer scenes were available, thus we had to use images captured in April. Water level was very high at that time and large areas were still covered by water.

Tab. 1: Remote sensing data source and bands used for this study.

Study Area	Sensor	Date of capture	Geometric resolution	Spectral resolution	Radiometric resolution
1	QuickBird	04.09.2007	0.6 m PAN 2.4 m MS	450 – 900 nm	11 Bit
				450 – 520 nm 520 – 600 nm 630 – 690 nm 760 – 900 nm	
2	WorldView I	20.04.2008 23.04.2008 05.06.2008	0.5 m PAN	445 – 900 nm	11 Bit
	SPOT 2	25.07.2008	20 m MS	500 – 590 nm 610 – 680 nm 780 – 890 nm	7 Bit

2.3 Field Data

Field data for classes 1 to 12 (Tab. 2) were collected by biologists in summer 2007 for both areas. At the same time, biomass and carbon content samples were taken in mono-dominant stands from randomly chosen sites (0.25 m²) (Section 3.4). The vegetation patches were mapped in the field with help of GPS and aerial photographs. They had a minimum size of 5 m² and were afterwards geolocated by the biologists on-screen with help of the very high resolution satellite data. Training and validation samples for the other classes (13 to 16) were digitised directly from the satellite images. Ground truth for all wetland classes were then split randomly into training and validation samples (Tab. 2). Since all sites and classes were pooled for the selection process, the random selection yielded varying proportions of training and validation pixels.

3 Methods

3.1 Pre-processing

The processing level of all data was standard imagery (system corrected), which was then georeferenced on the basis of topographic maps, followed by a conversion to top of the atmosphere radiance. Clouds and cloud shadows were masked out. QuickBird has a very high geometric resolution of 2.4 m/0.6 m (multispectral/ panchromatic) pixel size at nadir, WorldView I even has a 0.5 m pixel size at nadir. This results in a large amount of data to be processed by the data mining tools we used for the decision tree classification. In order to substantially reduce the file size, we clustered the panchromatic masked QuickBird and WorldView I images with a number of 30 classes into spectrally homogeneous areas with the Isodata approach (TOU & GONZALEZ 1974). File size was that way cut in half. This was followed by the computation of single channel means of the multispectral data (study area 1: QuickBird, study area 2: SPOT), different tex-

Tab. 2: Classes and number of training and validation sites. Pixel size 0.6 x 0.6 m for study area 1 and 1.0 x 1.0 m for study area 2.

Class ID	Class name	# of training pixels area 1	# of training pixels area 2	# of validation pixels area 1	# of validation pixels area 2
1	Open water	190	51527	33	12409
2	Floating leaved macrophytes	1942	-	177	-
3	Submersed macrophytes	108	-	21	-
4	Duckweed (<i>Lemna</i> spp.)	481	38	31	0
5	Common reed (<i>Phragmites australis</i>)	20787	25133	1935	6888
6	Cattail (<i>Typha</i> spp.)	11008	21018	1012	4907
7	Sedges (<i>Carex</i> spp.)	1308	45585	145	15466
8	Reed canary grass (<i>Phalaris arundinacea</i>)	20787	839478	483	230983
9	Seasonal flooded grassland	46	151695	5	42460
10	Mannagrass (<i>Glyceria maxima</i>)	511	2955	73	655
11	Spike rush (<i>Eleocharis</i> spp.)	219	-	27	-
12	Soft rush (<i>Juncus</i> spp.)	-	40034	-	9476
13	Woods and shrubs	91851	263576	2375	77624
14	Other classes	5643	8271	271	2585
15	Clouds	1809	-	127	-
16	Shadow	221	-	10	-

tural measures including grey level co-occurrence GLCM (HARALICK et al. 1973) and several ratios as well as indices for every single cluster. Ratios, indices and texture measures are very helpful for classification since they can emphasise small differences between classes, as has been shown in many studies, e. g. for landcover classification with IKONOS data (TASSETTI et al. 2010) or for tree species classification with airborne data (LI et al. 2010). Finally, more than 30 different attributes per cluster were calculated and then used as model attributes in the decision tree classification. Since not all of these might provide valuable predictive information and thus would add to computation burden we pre-selected only the most important ones using a leave-one-out approach (see following section).

3.2 Decision Tree Algorithms

For a detailed discussion of decision trees, see BREIMAN et al. (1984). Only a short introduction of the most important principles shall be given here. Decision trees can be used as predictive models and consist of different levels of nodes. The root node or whole data set is divided (split) into more homogeneous groups. This is achieved by a statistical measure (e. g. entropy) which tries to find the attribute with the most discriminatory power and then sets a threshold. Split nodes subsequently contain only part of the data and can further be divided until an end node (leaf) is reached where no further split is possible or desired. Different split criteria like information gain ratio or entropy can be used to find the thresholds. Since the tree can be grown until every single training sample is correctly classified, erroneous data may lead to a bad performance when using the tree on other samples not used for the training. To avoid this so-called overfitting, the tree can be reduced by pruning. With the help of different statistical measures the tree is cut back and thus generalised. For a detailed description see e. g. KEARNS & MANSOUR (1998) or QUINLAN (1993).

Nevertheless decision trees are considered as rather 'weak' learners compared to parametric classifiers like maximum likelihood

(e. g. CHAN & PAELINCKX 2008). Ensemble classification methods can be used to overcome this problem. Two common strategies are boosting and bagging (FREUND & SCHAPIRE 1996, BREIMAN 1996). In both methods several trees or several weak classifiers are combined into a new strong classifier, only the way of selecting training samples differs.

Boosting uses a special set of weights for all training samples, increasing the weight after each run for the misclassified samples and decreasing it for the correct samples. It concentrates more and more on the difficult cases and thus optimises the classifier. The final class is assigned by a weighted majority vote of all single trees. A widely used algorithm implementing boosting is AdaBoost (FREUND & SCHAPIRE 1996). More information on boosting can be found in SCHAPIRE (1999) or BÜHLMANN & HOTHORN (2007).

Bagging means that for every classification run only a subset of the whole training set is selected randomly (BREIMAN 1996). For each new tree a new subset is selected, while always considering the whole set of training samples. This so-called replacement can lead to some training samples being present in all the different subsets whereas some training samples are never considered at all. The final class is assigned by a simple majority vote of all single trees.

We chose three different widely used decision tree classifiers for this study: AdaBoost, See5 and RandomForest. The first two incorporate boosting and the last one uses bagging. See5 employs the information gain ratio as a split criterion (QUINLAN 1993). In order to balance computation time and model accuracy we used after several trials with different settings the following thresholds: boosting with 10 trees, 25% global pruning and at least 2 cases had to be at an end node.

Firstly, all attributes that were calculated for every single cluster (ratios, indices and texture measures) were used to build a model with the 'winnowing' option of See5 in order to assess their importance and predictive information. See5 estimates the increase in the models true error rate if one attribute was left out and then orders the attributes accordingly. Seven attributes were thus selected for all following classification runs for study area 1 and

Tab. 3: Attributes used for all classification runs, sorted by importance. All attributes were calculated for every ISODATA-segment (for study area 1: based on QuickBird segments, for study area 2: based on WorldView I segments).

Study area	Attribute name	Description
1	ms3glcm1	Mean Red (GLCM) QuickBird
	ms4glcm1	Mean NIR (GLCM) QuickBird
	4min2	Difference NIR minus Green QuickBird
	2min1	Difference Green minus Blue QuickBird
	3min2	Difference Red minus Green QuickBird
	r3l	Ratio Red/Blue QuickBird
	ms4glcm2	Variance NIR (GLCM) QuickBird
2	ndvi	NDVI SPOT
	2min1	Difference Red minus Green SPOT
	3min2	Difference NIR minus Green SPOT
	3min1	Difference NIR minus Red SPOT
	spot1	Mean Green SPOT
	spot2	Mean Red SPOT
	spot3	Mean NIR SPOT
	wvmean	Mean WorldView
	r3l	Ratio NIR/Red SPOT
	r2l	Ratio Red/Green SPOT
	glcm1	Mean WorldView (GLCM)
	glcm4	Contrast WorldView (GLCM)
	glcm8	Correlation WorldView (GLCM)

thirteen attributes were selected for study area 2 (Tab. 3). Several texture measures were among the attributes with high importance. The selected attributes vary for both areas because the remote sensing data sources are very different (QuickBird versus SPOT and WorldView I).

As a second decision tree classifier we used the multi-class implementation of AdaBoost (FREUND & SCHAPIRE 1996). To balance computation time and model accuracy we finally used 30 trees after several trials with different numbers of trees. Since AdaBoost is a meta-algorithm, capable of using all different kinds of weak classifiers, we selected a simple decision tree stump, where the split criterion uses information gain. Again at least 2 cases had to be at an end node. The third decision tree classifier was RandomForest (BREIMAN 2001). It employs the gini index (a measure of inequality) as a split criterion. Because the computation burden is quite high for RandomForest we were not able to use more than 10 trees.

3.3 Iterative Classification

A certain increase in training set size was shown to improve classification quality with decision tree algorithms (MAHESH & MATHER 2003) and also the joint application of multiple algorithms can increase classification accuracy (XI et al. 2008). Since for some vegetation classes, sufficient and homogeneous ground truth data is not easy to collect, a new approach of an iterative classification was applied. We assumed that after a first classification run, based on ground truth training data with different classification algorithms, those results can be combined to extract new training information. Pixels where all algorithms decide for the same class are likely to be correctly classified. In this study, new training samples are generated from the intersection of the three classifiers. With the newly obtained training set a second classification run is completed. Through this approach the training set is increased (approx. five times the size of the initial set) and also pixels that were wrong in the initial set can thus be identified and delet-

ed. For example, many water pixels were included in the classes floating leaved macrophytes and also in the different reed classes, those were eliminated in the second run from the training set.

3.4 Biomass and Carbon Stock Assessment

The aboveground biomass of the most common helophytes was harvested in 2007 in mono-dominate stands from randomly chosen sites (0.25 m²) at the beginning of their flowering time when shoot biomass approaches net primary production (DYKÝJOVÁ & KVĚT 1978, ODONK & KVĚT 1978) and contains the peak of nutrients (BERNHARD & HANKINSON 1979). Overall, we analysed the aboveground biomass and carbon stock of *Phragmites australis* (40 sites), *Typha latifolia* (48 sites), *Glyceria maxima* (32 sites), *Carex riparia* (24 sites), *Carex acutiformis* (40 sites) and *Phalaris arundinacea* (40 sites). The samples were dried for 48 h at 85 °C, weighted to determine dry mass, grinded and homogenised. Carbon content of dry mass was measured with a CHN-Analyser “Vario EL III”.

Since the classification results have a very high spatial and thematic resolution, biomass and carbon storage can be calculated with a simple upscaling approach. We summarised the coverage of the investigated helophytes in the study areas and multiplied the area values with the specific biomass values [t DM = dry matter/ha] and carbon stock [t/ha].

4 Results

4.1 Classification Accuracy

The overall accuracy is not sufficient for the assessment of the total classifier performance, as some classes with large areas (and thus a large number of validation samples) influence the overall accuracy strongly, whereas classes with small occurrence but very high ecological importance are underrepresented. The mean class accuracy (mean of all single class accuracies) was thus used as an additional separability measure. For example the overall accuracy for study area 1 and the AdaBoost classification amounts to 92% whereas the mean class accuracy is only 80% since some small occurrence classes have a lower accuracy.

Tab. 4: Accuracies for the different classification algorithms trained with the intersected training sample set (second run).

Class ID	Study area 1			Study area 2		
	Ada30	2 RF10	2 See5	2 Ada30	2 RF10	2 See5
Open water	98,45	98,41	98,43	87,19	86,92	87,07
Floating leaved macrophytes	80,76	79,16	78,83	—	—	—
Submersed macrophytes	56,00	55,32	54,41	—	—	—
Duckweed (<i>Lemna</i> spp.)	98,19	95,76	90,58	96,05	96,05	96,05
Common reed (<i>Phragmites australis</i>)	83,69	83,49	82,74	60,87	60,66	60,72
Cattail (<i>Typha</i> spp.)	78,30	77,86	77,49	91,46	90,56	91,62
Sedges (<i>Carex</i> spp.)	70,38	67,23	66,35	89,25	88,85	89,08
Reed canary grass (<i>Phalaris arundinacea</i>)	82,10	80,62	79,24	89,43	89,38	89,36
Seasonal flooded grassland	55,47	55,69	52,51	88,06	87,62	87,82
Mannagrass (<i>Glyceria maxima</i>)	60,16	59,46	58,29	91,46	90,93	91,24
Spike rush (<i>Eleocharis</i> spp.)	79,61	79,14	80,16	—	—	—
Soft rush (<i>Juncus</i> spp.)	—	—	—	69,61	68,79	70,49
Woods and shrubs	92,41	91,97	91,01	74,50	74,54	74,51
Other classes	99,87	99,70	99,52	98,37	98,82	98,83
Clouds	98,71	98,54	98,52	—	—	—
Shadow	66,42	60,48	69,43	—	—	—
Mean class acc.	80,03	78,85	78,50	85,11	84,83	85,16
Overall acc.	91,58	91,20	90,78	84,95	84,81	84,89
Change in overall acc. compared to the first run	+8,13	+12,19	+1,51	−2,51	+0,23	+0,18

cy. All single class accuracies are listed in Tab. 4. The classifier with the highest accuracy (AdaBoost) was used as the final classification result. Still four problematic classes remain in study area 1 with lower accuracies than 80: submersed macrophytes, seasonal flooded grassland, sedges and mannagrass. For all these classes we had only very few training samples and also the iterative classification did not lead to a major improvement. Submersed macrophytes will always remain difficult, since they can only be detected by multispectral remote sensing if the water level is not too high above the plants. Seasonal flooded grassland can sometimes contain different reed species e. g. reed canary grass and thus leads to false misclassification. For sedges and mannagrass, a larger initial training sample would be desirable. Furthermore, the selected feature set might not be optimal for those two classes.

In study area 2, both overall and mean accuracy reached 85%. Three problematic class-

es remain in study area 2 with lower accuracies than 80: woods and shrubs, common reed and soft rush. Common reed and woods and shrubs in this area occurs in very thin stripes along water channels, the coarser resolution (20 m) of the SPOT multispectral data is thus certainly not adequate and the WorldView I texture was not sufficient to overcome this problem. This might be due to the different acquisition dates of the WorldView I and SPOT scenes. In April (WorldView I) phenology is only at the starting phase whereas in late July (SPOT) vegetation is at its peak. Another issue was that in April large areas were still flooded (thus providing no texture) whereas in late July the water level was at a very low point.

4.2. Monitoring Results for Polder Jargelin and Polder Beestland

The initial vegetation cover of dominant *Phalaris arundinacea* grassland in polder

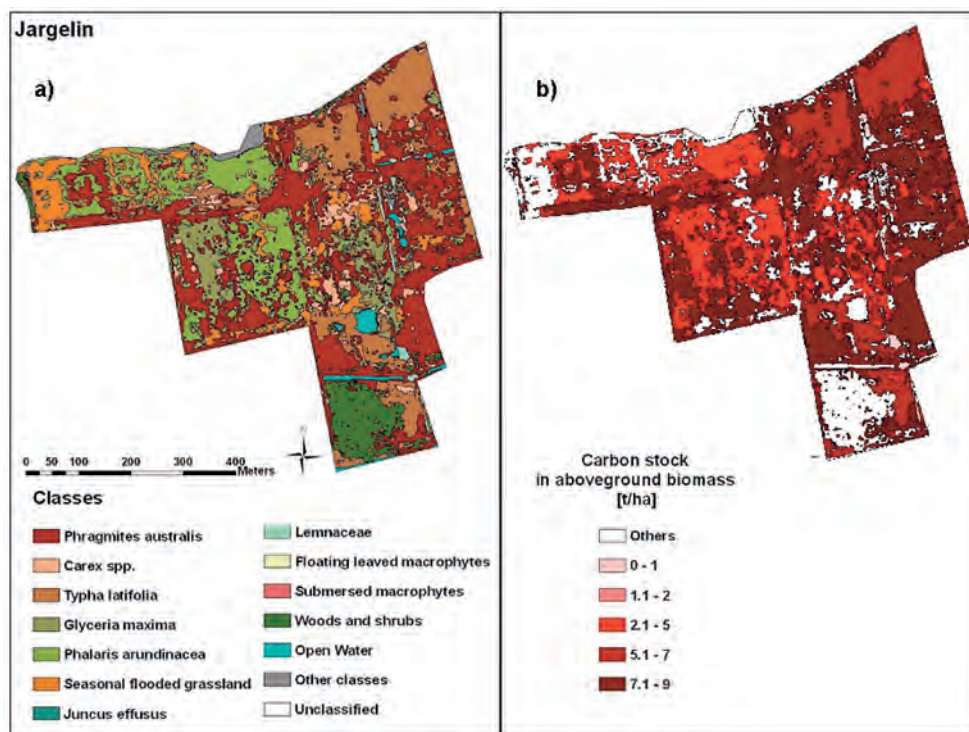


Fig. 3 a): Final classification result for the polder Jargelin in study area 1 (STEFFENHAGEN et al. 2008). **b):** Carbon stock in net aboveground biomass of helophytes in Polder Jargelin (STEFFENHAGEN et al. 2008).

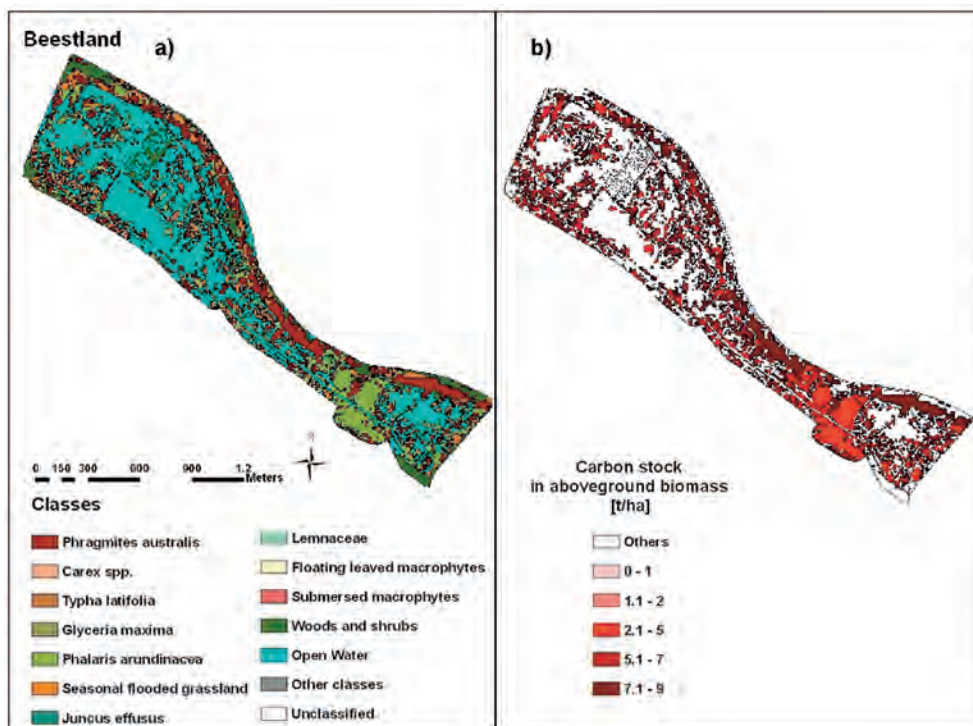


Fig. 4 a): Final classification result for the polder Beestland in study area 2. **b):** Carbon stock in net aboveground biomass of helophytes in Polder Beestland.

Jargelin has changed substantially after 12 years of rewetting as is illustrated by the classification results in Fig. 3a. Mainly reeds and sedges cover the area now. 39% of the polder are overgrown by *Phragmites australis* and sedges. This is of great importance since these species have the potential to accumulate peat, which can be interpreted as a first success in the restoration of this particular fen. Also biomass and carbon storage are highest for *Phragmites australis*.

For polder Beestland, the initial vegetation cover of dominant *Phalaris arundinacea* and *Festuca arundinacea* grassland has also changed substantially after only six years of rewetting. The classification results (Fig. 4a) indicate that the initial high intensity grassland vegetation has already changed to a helophyte dominated mosaic. Especially *Phragmites australis* could spread further starting from the dyke edges. A large part of the area is still covered with open water.

4.3 Biomass and Carbon Stock Assessment for Polder Jargelin and Polder Beestland

The aboveground biomass and carbon stock of helophytic vegetation during the growing season 2007 and 2008 showed a wide difference between polder Jargelin and polder Beestland (Fig. 3b and 4b). Although polder Beestland (165 ha) is nearly 5 times bigger than polder Jargelin (32 ha) the aboveground biomass and carbon stock was only twice as high as for polder Jargelin. We calculated for polder Beestland an aboveground biomass of 709 t and carbon stock of 328 t. For polder Jargelin overall aboveground biomass amounted to 318 t and carbon stock to 147 t. These differences are caused by the different dates of rewetting and also by the large areas still covered with open water in polder Beestland.

5 Discussion

5.1 Vegetation Development

After several years of rewetting degraded peatland, the now present vegetation still displays, according to the former land use, the grade of peatland degradation (TIMMERMAN et al. 2009), and the present hydrological conditions (TIMMERMAN et al. 2006). Common reed (*Phragmites australis*) is either already most abundant as in polder Jargelin or beginning to spread as in polder Beestland. Representing a cosmopolitan plant species with a broad ecological range with regard to nutrient supply, water level depth and land-use practice (OSTENDORP 1988, KÜHL & KOHL 1992, THEVS et al. 2007) this plant is one of the key species of nutrient rich lowland fens and river banks throughout Central Europe. Additionally, it is one of the target species in fen restoration (WILCOX & WHILLANS 1999, TIMMERMAN et al. 2009). As common reed has the potential of peat accumulation it has a considerable value with regard to ecosystem services like carbon sequestration (GROSSE-BRAUCKMANN 1990, BRIX et al. 2001, MANDER et al. 2008).

After rewetting, only never or rarely inundated sites were covered by canary grass (*Phalaris arundinacea*). Permanently inundated sites were replaced by reeds of *Phragmites australis*, *Typha latifolia*, and *Carex spp.* Open water, which occurred on sites with high soil shrinkage, was often dominated by submersed and floating leaved macrophytes and duckweed.

Both polders cannot be compared directly since rewetting date and initial situation differ. It can be said, that the vegetation development on both study sites is successful with regards to biomass and carbon storage and also to potential peat accumulation.

5.2 Methodological Approach

We developed an iterative decision tree based classification approach for the analysis of peatland vegetation that can be applied to operational optical satellite sensors with different spectral and spatial resolution. Texture is

very important for the separation of certain classes and thus at least a panchromatic very high resolution sensor should be used. Multispectral information can have a lower spatial resolution, though the use of 20 m SPOT imagery leads to a significant decrease in accuracy for some classes compared to 2.4 m QuickBird imagery. Particularly classes that cover only small areas or thin stripes like common reed and single trees and shrubs are better classified with QuickBird data. Furthermore and not surprisingly it can be concluded that accuracy is mostly higher for classes with larger training samples. The time of capture is also an important factor for the classification success. Images taken in April are not advisable for rewetted peatland since large areas are still covered by water.

Our intention was not to compare the different decision tree classifiers and ensemble classification methods but it can be said that all performed with similar good results for both sensors and all classes.

The suggested classification approach is straightforward and easy to implement – only computation time and the volume of data might be a problem. The developed method was applied to both complete study areas (more than 8000 ha) and yielded a valuable input not only to the observation of restoration success by rewetting but also to biomass and nutrient storage estimation. With qualified laboratory data regarding the nutrient storage and biomass production of single wetland plant species and vegetation forms the presented classification results can be a very helpful input to the further assessment of restoration results. Peatland can function as carbon sink and may influence the global climate regulation. Thus, the carbon storage and biomass production of rewetted fens are of great interest and can be estimated in high detail for large areas if adequate vegetation maps are available (Fig. 3b and 4b).

6 Conclusion

We analysed the vegetation composition of rewetted peatlands with multispectral and very high spatial resolution satellite imagery. We developed an iterative classification approach

based on decision trees. Evaluation criteria were overall and mean class accuracy. Two sites with different rewetting dates were investigated and also biomass and carbon content samples for the main plant species were taken in order to estimate nutrient storage.

Multispectral and very high spatial resolution satellite data and the developed method allow the classification of the most important vegetation types in rewetted fens. All applied sensors (QuickBird; WorldView I in combination with SPOT) yield good results with overall accuracies of 85% and 92%. The use of multispectral imagery with a high spatial resolution like QuickBird leads to a higher classification accuracy for some classes compared to SPOT imagery.

With the obtained vegetation maps, the observation of successional trends on the regional level, in particular the development of peat-forming vegetation (GROSSE-BRAUCKMANN 1990, HARTMANN 1999, RICHERT et al. 2000) was possible and thus can improve the prediction and fulfilment of precise restoration targets (PFADENHAUER & KLÖTZLI 1996). Furthermore, the detailed extent of the identified vegetation types can be estimated and provides valuable input for other purposes such as biomass and nutrient storage assessment. Particularly the accurate area-wide analysis of carbon storage in rewetted fens is of great interest with regard to their potential contribution to green house gas emission reduction. Overall, as vegetation is one of the most important ecological indicators (ELLENBERG 1996, JANSEN et al. 2009), a broad range of environmental questions can be tackled with the results of our approach.

Remote sensing can be an essential tool for the monitoring of peatland since an area-wide terrestrial mapping of similar accuracy and detail is often not feasible.

Acknowledgements

This research project was funded by the *Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie* of the federal state of Mecklenburg-Vorpommern, Germany. We thank in particular Dr. Uwe Lenschow for supporting our work with valuable comments. We are also

thankful for the helpful comments given by the two anonymous reviewers. Furthermore we very much appreciate the help of Cameron Davey in improving the English text.

References

- BECKER, B.L., LUSCH, D.P. & QI, J., 2007: A classification-based assessment of the optimal spectral and spatial resolutions for Great Lakes coastal wetland imagery. – *Remote Sensing of Environment* **108**: 111–120.
- BERNHARD, J.M. & HANKINSON, G., 1979: Seasonal changes in standing crop, primary production and nutrient levels in a *Carex rostrata* wetland. – *Oikos* **32**: 328–336.
- BREIMAN, L., 1996: Bagging predictors. – *Machine Learning* **24** (2): 123–140.
- BREIMAN, L., 2001: Random forests. – *Machine Learning* **45** (1): 5–32.
- BREIMAN, L., FRIEDMAN, J., OLSEN, R. & STONE, C., 1984: *Classification and Regression Trees*. – Chapman and Hall, New York, USA.
- BRIX, H., SORRELL, B.K. & LORENZEN, B., 2001: Are *Phragmites*-dominated wetlands a net source or net sink of greenhouse gases? – *Aquatic Botany* **69** (2–4): 313–324.
- BÜHLMANN, P. & HOTHORN, T., 2007: Boosting algorithms: regularization, prediction and model fitting. – *Statistical Science* **22** (4): 477–505.
- DYKJOVÁ, D. & KVĚT, J., 1978: *Pond Littoral Ecosystems – Structure and Functioning*. – Springer, Berlin.
- CHAN, J.C.-W. & PAELINCKX, D., 2008: Evaluation of Random Forest and Adaboost tree-based ensemble classification and spectral band selection for ecotope mapping using airborne hyperspectral imagery. – *Remote Sensing of Environment* **112**: 2999–3011.
- ELLENBERG, H., 1996: *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht*. – 5th ed., Ulmer, Stuttgart.
- FISCHER, U., 2005: *Entwicklung der Kulturlandschaft im Peene-Talmoor seit 1700. Historisch-landschaftsökologische Untersuchung eines nordostdeutschen Flußtalmoores unter besonderer Berücksichtigung des frühneuzeitlichen Zustandes*. – Dissertation, Greifswald University.
- FREUND, Y. & SCHAPIRE, R.E., 1996: Experiments with a new boosting algorithm. – *Machine Learning: Thirteenth International Conference*: 148–156.
- FRIEDL, M.A. & BRODLEY, C.E., 1997: Decision tree classification of land cover from remotely sensed data. – *Remote Sensing of Environment* **61**.

- GELBRECHT, J., ZAK, D. & AUGUSTIN, J. (Eds.), 2008: Phosphor- und Kohlenstoffdynamik und Vegetationsentwicklung in wiedervernässten Mooren des Peenetales in Mecklenburg-Vorpommern. – Berichte des IGB (Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei) **26**.
- GROSSE-BRAUCKMANN, G., 1990: Ablagerungen der Moore. – Moor- und Torfkunde: 175–236; Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- HARALICK, R.M., SHANMUGAN, K. & DINSTEN, I., 1973: Textural Features for Image Classification. – IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics **3** (6): 610–621.
- HARTMANN, M., 1999: Species dependent root decomposition in rewetted fen soils. – Plant and Soil **213**: 93–98.
- HEROLD, N.D., KOELN, G. & CUNNINGHAM, D., 2003: Mapping Impervious Surfaces and Forest Canopy Using Classification and Regression Tree (CART) Analysis. – ASPRS 2003 Annual Conference.
- HÜTTICH, C., GESSNER, U., HEROLD, M., STROHBACH, B.J., SCHMIDT, M., KEIL, M. & DECH, S., 2009: On the Suitability of MODIS Time Series Metrics to Map Vegetation Types in Dry Savanna Ecosystems: A Case Study in the Kalahari of NE Namibia. – Remote Sensing **1** (4): 620–643.
- JANSEN, F., ZERBE S. & SUCCOW, M., 2009: Changes in landscape naturalness derived from a historical land register – a case study from NE Germany. – Landscape Ecology **24** (2): 185–196.
- KEARNS, M. & MANSOUR, Y., 1998: A fast, bottom-up decision tree pruning algorithm with near-optimal generalisation. – 15th International Conference on Machine Learning: 269–277.
- KOWATSCH, A., 2007: Moorschutzkonzepte und -programme in Deutschland. – Naturschutz und Landschaftsplanung **39** (7): 197–204.
- KÜHL, H. & KOHL, J.G., 1992: Nitrogen accumulation, productivity and stability of reed stands (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel) at different lakes and sites of the lake districts Uckermark and Mark Brandenburg. – Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie **77**: 85–107.
- LAWRENCE, R.L., WOOD, S.D. & SHELEY, R.L., 2006: Mapping invasive plants using hyperspectral imagery and Breiman Cutler classifications (RandomForest). – Remote Sensing of Environment **100**: 356–362.
- LENSCHOW, U., 1997: Landschaftsökologische Grundlagen und Ziele zum Moorschutz in Mecklenburg-Vorpommern. – Landesamt für Umwelt und Natur Mecklenburg-Vorpommern (Ed.) **3**.
- LI, Z., HAYWARD, R., ZHANG, J., JIN, H. & WALKER, R., 2010: Evaluation of spectral and texture features for object-based vegetation species classification using support vector machines. – ISPRS TC VII Symposium, IAPRS XXXVIII (7A).
- LUNG, 1994–1997: Moorstandortkatalog Mecklenburg-Vorpommern. – Güstrow.
- MANDER, U., LOHMUS, K., TEITER, S., MAURING, T., NURK, K. & AUGUSTIN, J., 2008: Gaseous fluxes in the nitrogen and carbon budgets of subsurface flow constructed wetlands. – Science of the Total Environment **404** (2–3): 343–353.
- ODONK, J.P. & KVÉT, J., 1978: Selection of sampling areas in assessment of production. – Pond Littoral Ecosystems – Structure and Functioning: 163–174; Springer, Berlin.
- OSTENDORP, W., 1988: Nährstoffkreisläufe und Nährstoffakkumulation in Seeufer-Schilfröhrichten – am Beispiel des Bodensee-Untersees. – Telma **18**: 351–372.
- OTUKEI, J. & BLASCHKE, T., 2010: Land cover change assessment using decision trees, support vector machines and maximum likelihood classification algorithms. – International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation **12**: 27–31.
- PÄTZOLT, J. & JANSEN, F., 2004: Molinio-Arrhenatheretea Tx. 1937 – Wirtschaftsgrünland. – Die Pflanzengesellschaften Mecklenburg-Vorpommerns und ihre Gefährdung: 336–353; Weißdorn-Verlag, Jena.
- PENGR, B.W., JOHNSTON, C.A. & LOVELAND, T.R., 2007: Mapping an invasive plant, *Phragmites australis*, in coastal wetlands using the EO-1 Hyperion hyperspectral sensor. – Remote Sensing of Environment **108**: 74–81.
- PERROW, M.R. & DAVY, A.J. (eds.), 2002: Handbook of Ecological Restoration. – Cambridge University Press, Vol. **1** and **2**; Cambridge, UK.
- PFADENHAUER, J. & KLÖTZLI, F., 1996: Restoration experiments in middle European wet terrestrial ecosystems: An overview. – Vegetatio **126** (1): 101–115.
- QUINLAN, J.R., 1993: C4.5: Programs for Machine Learning. – Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, USA.
- RICHERT, M., DIETRICH, O., KOPPISCH, D. & ROTH, S., 2000: The influence of rewetting on vegetation development and decomposition in a degraded fen. – Restoration ecology **8** (2): 186–195.
- ROTH, S., 2000: Etablierung von Schilfröhrichten und Seggenriedern auf wiedervernässten Niedermoor. – Dissertation, Greifswald University.
- RUIZ, L.A., FDEZ-SARRIA, A. & RECIO, J.A., 2004: Texture Feature Extraction for Classification of Remote Sensing Data Using Wavelet Decomposition: A Comparative Study. – 20th ISPRS Congress, IAPSR XXXV (B4): 1109–1114.

- SCHAPIRE, R.E., 1999: A brief introduction to boosting. – Sixteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence **2**: 1401–1406.
- STEFFENHAGEN, P., FRICK, A., TIMMERMANN, T., ZERBE, S. & SCHULZ, K., 2008: Vegetationsentwicklung sowie Kohlenstoff- und Nährstoffspeicherung in der pflanzlichen Biomasse wiedervernässter Niedermoore. – Phosphor- und Kohlenstoff-Dynamik und Vegetationsentwicklung in wiedervernässten Mooren des Peenetales in Mecklenburg-Vorpommern – Status, Steuergrößen und Handlungsmöglichkeiten, Berichte des IGB **26**: 142–160.
- SUCCOW, M., 2001: Revitalisierung von Moorökosystemen – Beispiele in Nordostdeutschland. Grundsätze. – Landschaftsökologische Moorkunde: 496–497; Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- SUCCOW, M. & JOOSTEN, H. (Eds.), 2001: Landschaftsökologische Moorkunde. – 2nd ed., Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- TASSETTI, A.N., MALINVERNI, E.S. & HAHN, M., 2010: Texture Analysis to improve supervised classification in Ikonos Imagery. – ISPRS TC VII Symposium, IAPRS **XXXVIII** (7A).
- TEMPERTON, V.M., HOBBS, R.J., NUTTLE, T. & HALLE, S., 2004: Assembly rules and restoration ecology: Bridging the gap between theory and practice. – Island Press, Washington, USA.
- THEVS, N., ZERBE, S., GAHLERT, F., MIJIT, M. & SUCCOW, M., 2007: Productivity of reed (*Phragmites australis* Trin. ex Steud.) in continental-arid NW China in relation to soil, groundwater, and land-use. – Journal of Applied Botany and Food Quality **81**: 62–68.
- TIMMERMANN, T., JOOSTEN, H. & SUCCOW, M., 2009: Renaturierung von Mooren. – Renaturierung von Ökosystemen in Mitteleuropa: 55–93; Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- TIMMERMANN, T., MARGÓCZI, K., TAKÁCS, G. & VEGELIN, K., 2006: Restoring peat forming vegetation by rewetting species-poor fen grasslands: the role of water level for early succession. – Applied Vegetation Science **9**: 241–250.
- TOU, J. & GONZALEZ, R., 1974: Pattern Recognition Principles. – Sensing of Environment **61**: 399–409.
- VAN ANDEL, J. & ARONSON, J., 2006: Restoration ecology. The new frontier. – Blackwell Publ., Oxford, UK.
- WILCOX, D.A. & WHILLANS, T.H., 1999: Techniques for restoration of disturbed coastal wetlands of the Great Lakes. – Wetlands **19** (4): 835–857.
- ZERBE, S. & WIEGLEB, G. (eds.), 2009: Renaturierung von Ökosystemen in Mitteleuropa. – Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

Addresses of the Authors:

Dr. ANNETT FRICK, LUP GmbH, D-14469 Potsdam, Tel.: +49-331-2757760, Fax: +49-331-2757799, e-mail: annett.frick@lup-umwelt.de

Prof. Dr. STEFAN ZERBE, Free University of Bozen, I-39100 Bolzano, Italy, Tel.: +39-04710-17150, e-mail: stefan.zerbe@unibz.it

PEGGY STEFFENHAGEN, Dr. TIEMO TIMMERMANN and KARSTEN SCHULZ, Universität Greifswald, Institut für Botanik und Landschaftsökologie, D-17487 Greifswald, Tel.: +49-3834-775760, -864112, -775760, Fax.: +49-3834-864114, e-mail: peggy_steffenhagen@gmx.de, tiemo@uni-greifswald.de, netsrak@gmx.ch

Manuskript eingereicht: Januar 2011
Angenommen: März 2011



New Object Level Strategy for Image Fusion Quality Assessment of High Resolution Satellite Imagery

FARHAD SAMADZADEGAN & FARZANEH DADRAS JAVAN, Tehran, Iran

Keywords: Image Fusion, Quality Assessment, Quality Metrics, Object Level, Pixel Level

Summary: Nowadays, topographic earth observation satellites provide panchromatic images at a higher spatial resolution and also multi-spectral images at a lower spatial resolution which is rich in spectral information. Image fusion techniques produce new images which inherit the merits of initial panchromatic and multi spectral images. Considering the importance of fusion accuracy on the quality of the next applications, it seems necessary to evaluate the quality of these processed pan-sharpened images. Lots of quality evaluation metrics have been proposed for quality assessment of fused images. These methods are mainly developed on the basis of applying quality metrics in pixel level and to evaluate the final quality by averaging computation. In this paper, an object level strategy for fusion quality assessment is proposed. Based on the proposed strategy, image fusion quality metrics are applied on image objects and quality assessments are conducted to inspect fusion quality in those image objects. Results obtained from applying several pan-sharpen QuickBird imagery, clearly show the in-consistency of fusion behaviour in different image objects and the weakness of traditional pixel level strategies in handling these heterogeneities.

Zusammenfassung: *Neue Strategie auf der Objektebene für die Qualitätsbewertung von hoch aufgelösten Satellitenbildern.* Heute erzeugen Erdbeobachtungssatelliten panchromatische Bilder mit hoher räumlicher Auflösung und multi-spektrale Bilder mit niedrigerer räumlicher Auflösung und vielfältigen spektralen Informationen. Bildfusions-techniken erstellen neue Bilder, die Eigenschaften der eingehenden panchromatischen und multi-spektralen Bilder aufweisen. Zieht man die Wichtigkeit der Fusionsgenauigkeit für neue Anwendungen in Betracht, erscheint es notwendig, die Qualität dieser bearbeiteten pan-geschärften Bilder zu bewerten. Viele Bewertungssysteme wurden bereits zur Bewertung der zusammengeführten Bilder angeboten. Diese Methoden sind hauptsächlich entwickelt worden, um die metrischen Bewertungssysteme auf Pixel-Niveau anzuwenden und die Endqualität anhand einer Durchschnittsberechnung auszuwerten. Die vorliegende Arbeit stellt eine Strategie auf der Objektebene vor. Grundlage dieser Strategie ist es, das Bildfusionsqualitätsbewertungssystem auf der Objektebene einzusetzen und Qualitätsbewertungen durchzuführen, um die Fusionsqualität auf der Objektebene zu prüfen. Wird diese Strategie zur Verarbeitung von verschiedenen pan-geschärften Bildern von QuickBird verwendet, zeigen die Resultate eindeutig die Unvereinbarkeit im Verhalten der Fusion für verschiedene Objekte sowie die Schwäche der traditionellen Strategie auf Pixelebene mit diesen Verschiedenartigkeiten umzugehen.

1 Introduction

Topographic earth observation satellites, such as IKONOS, Quick Bird and GeoEye, provide both panchromatic images at a higher spatial resolution and multi-spectral images at a lower spatial resolution but rich spectral information

(RANCHIN & WALD 2000, REYES et al. 2004, THOMAS & WALD 2004). Several technological limitations make it impossible to use a sensor of both high spatial and spectral characteristics (THOMAS & WALD 2004).

To surmount these limitations, image fusion as a mean of enhancing the information

content of the initial images to produce new images rich in information content, has drawn an increasing attention in recent years (REYES et al. 2004, THOMAS & WALD 2004). Remote sensing communities have also switched to merge multi-spectral and panchromatic images in order to exhibit complementary characteristics of spatial and spectral resolutions. This new product is called pan-sharpen image.

During last decades, a wide range of fusion methods have been developed to produce multi spectral images having the highest spatial resolution available within the dataset (RANCHIN & WALD 2000, REYES et al. 2004). Nevertheless, as these new images do not exactly show the behavior of the real objects, acquired by the remote sensing sensors, quality assessment of these data seems crucial before using them in further process of object extraction or recognition. The widespread use of pan-sharpen images has led to a rising demand of developing methods for evaluating the quality of these processed images (WALD 2000, PIELLA et al. 2003, ZHANG 2008).

Image quality assessment methods can be divided into two classes: Subjective assessments by humans and objective assessments by algorithms designed to mimic human subjectivity (SHI et al. 2005). Subjective analysis involves visual comparison of colors between original MS and fused images, and the spatial detail between original panchromatic and fused images (ZHANG 2008). This method cannot be represented by rigorous mathematical models, and their techniques are mainly visual, costly and time consuming procedures (SHI et al. 2005).

Considering limitations of the subjective quality assessment, much effort has been devoted to develop objective image fusion quality assessment methods (SHI 2005, ZHANG 2008, ALPARONE et al. 2004). These kinds of methods involve a set of predefined quality indicators for measuring the spectral and spatial similarities between the fused image and the original MS and/or Pan images (ZHANG 2008). In parallel to the researches being conducted to inspect different fusion quality assessment metrics, a different strategy was also studied. In this strategy fusion quality is inspected in different levels of image information as pix-

els, features and objects. While most of researches on this issue are conducted in pixel level strategy, feature level quality assessment is also recommended. XYDEAS & PETROVIC (2000) correlated important visual information with edges and addressed an objective fusion performance measure associated with edge intensity and orientation. Besides, CHEN & BLUM (2005), inspected the quality of fusion by evaluating the amount of edge information transferred from the source images to the fused image. Besides, some other studies are conducted based on object level quality assessments. For example, SEETHA et al. (2007) developed an object wise fusion quality assessment strategy. In the study an attempt was made to obtain the objective measurements using content based segmentation for evaluating the performance of the fused images.

To have a comprehensive evaluation over fusion quality, quality assessment techniques should have a detailed overview over spatial and spectral characteristics of fused images in object level. Doing so, it provides capabilities of monitoring and assessing fusion quality locally and based on effective parameters in application of images such as image object size, important and effective usage in next levels of processing.

2 Image Fusion Quality Metrics

Image fusion quality metrics (IFQMs) are classified based on the level of spectral information that considers in quality assessment process. Traditionally, these metrics are classified to mono-modal and multi-modal techniques (ALPARONE et al. 2004, THOMAS & WALD 2006a). A mono-modal metric applies to a single modality (such as Entropy, UQI) while a multi-modal metric applies to several modalities (Like ERGAS and SAM) which in case of fusion quality assessment means they consider all spectral bands of images for evaluation.

Mono Modal IFQMs: THOMAS & WALD (2006a) applied Difference In Variance (DIV), standard deviation and correlation coefficient as mono modal metrics. They applied the metrics for quality evaluation of well-known im-

ages of the mandrill and Lena and images were acquired by satellite observing systems, SPOT-2 and SPOT-5. Similarly, RIYAH I et al. (2009) made use of DIV and correlation coefficient as quality metrics to evaluate fusion performance of QuickBird satellite imagery. CHEN & BLUM (2005), performed some experimental tests according to evaluate quality of image fusion for night vision. They used Standard deviation, SNR (Signal to Noise Ratio) and entropy index as standard quality metrics to extract features from fused image itself. They also used cross entropy based and information based measures to utilize feature of both fused image and source images. SHI et al. (2005) applied variety of objective quality metrics, such as correlation, mean value and standard variation, to evaluate wavelet based image fusion of panchromatic Spot image and multi spectral TM image.

Entropy, correlation coefficient and mean square error are some of mono modal metrics that were used by Vijayaraj for quantitative analysis of pan-sharpen images (VIJAYARAJ 2004). WANG et al. (2004) introduced the main idea of Structural Similarity (SSIM) which is one of the mono modal. A simplified version of the metric, entitled as Universal Image Quality (UQI) index was introduced by WANG & BOVIK (2002) and applied for quality evaluation of IKONOS fused images by ZHANG (2008). PIELLA & HEIJMAN (2003) added weighted averaging to UQI to measure the performance of image fusion. This new metric was entitled as saliency factor and was practiced by HOSSNY et al. (2007) for image fusion quality assessment. PIELLA & HEIJMAN (2003) also introduced weighted saliency factor for fusion quality assessment.

Multi Modal IFQMs: On the other hand, WALD (2000) introduces ERGAS as a multi-modal index to characterize the quality of process and, present the normalized average error of each band of processed image. ALPARONE et al. (2004) used ERGAS and SAM for image fusion assessment of IKONOS satellite imagery. RIYAH I et al. (2009) used ERGAS and its modified version RASE (Relative Average Spectral Error) for inspecting different image fusion methods. VAN DER MEER (2005), studied SCM (Spectral Correlation Measure) and SAM for analysis of hyper spectral imagery.

Amongst all mono-modal Image Fusion Quality Metrics, UQI has been more frequently used and brought up to be more efficient, reliable and successful (WANG & BOVIK 2009, ZHANG 2008). The same story is factual for SAM in terms of multi modal image quality metrics (ZHANG 2008, CARVALHO et al. 2000, VAN DER MEER 2005).

2.1 Universal Quality Index

Structural Similarity Image Metric (SSIM) is a common mono modal metrics introduced by THOMAS & WALD (2006a), and more formally distilled in WANG et al. (2004). The basic form of SSIM is very easy to understand. Suppose that x and y are local image patches taken from the same location of two images that are being compared. The local SSIM index measures the similarities of three elements of the image patches: the similarity $l(x, y)$ of the local patch luminance (brightness values), the similarity $c(x, y)$ of the local patch contrasts, and the similarity $s(x, y)$ of the local patch structures. These local similarities are expressed in the following equation (WANG & BOVIK 2009).

$$S(x, y) = l(x, y) \cdot C(x, y) \cdot S(x, y) \quad (1)$$

$$= \frac{2 \cdot \bar{x} \cdot \bar{y} + c_1}{\bar{x}^2 + \bar{y}^2 + c_1} \cdot \frac{2 \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y + c_2}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \cdot \frac{\sigma_{xy} + c_3}{\sigma_x \cdot \sigma_y + c_3}$$

where $\bar{x}$ and $\bar{y}$ are the local sample means of x and y , σ_x and σ_y are the local sample standard deviations of x and y , and σ_{xy} is the sample cross correlation of x and y after removing their means. The items c_1 , c_2 , and c_3 are small positive constants that stabilize each term. The Universal Quality Index (UQI) corresponds to the case that $c_1 = c_2 = c_3 = 0$ (WANG et al. 2004).

$$Q = \frac{4 \cdot \sigma_{xy} \cdot \bar{x} \cdot \bar{y}}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)(\bar{x}^2 + \bar{y}^2)} \quad (2)$$

Q index is bounded in $[-1, 1]$ and its maximum value of $Q = 1$ achieved when patch x has the same statistical properties as patch y . In this study Q index is computed locally using a sliding window moving through images. Q index of the whole image is computed by averaging

the achieved local quality indices over local regions.

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{w=1}^N Q_w \quad (3)$$

Where Q_w indicates the calculated quality index within the sliding window w , and N is the total number of patches used to calculate Q index.

2.2 Spectral Angle Mapper

One of the most common multi modal metrics is Spectral Angle Mapper (SAM) which is a tool that permits rapid mapping of spectral similarity of image spectra to reference spectra (WALD 2000). The algorithm attempts to obtain the angle formed between the reference spectrum and the processed spectrum treating them as vectors in space by dimensionality equal to the number of bands (LEUNG et al. 2001), consequently SAM is a multi modal image quality metric. For a specific image pixel i ($i = 1, 2, 3, \dots, m$; m = number of image pixels) SAM index is given as:

$$\cos(\alpha) = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^N x_i \cdot x_i \sum_{i=1}^N y_i \cdot y_i} \quad (4)$$

where N is the number of bands of images or the dimension of the spectral space, $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ and $y = (y_1, y_2, \dots, y_N)$ are two spectral vectors with same wavelength from the multi-spectral and fused images respectively. The computed α is the spectral angle for each specific pixel which ranges from 0 to 90 and the minor angle represents the major similarity in image vectors (CARVALHO et al. 2000). Averaging over the whole image yields global measurement of spectral distortion.

3 Proposed Object Level Image Fusion Quality Assessment

To overcome limitations of the traditional strategies in evaluation of fusion quality with respect to different image objects, this paper presents an object level strategy based on both spectral and shape characteristics of objects

(Fig. 1). In proposed strategy, after generating pan-sharpen image in Phase 1, image objects are extracted from input and pan-sharpen imagery (Phase 2). These objects are computational units for evaluation of fusion quality metrics in Phase 3. In Phase 4, object level fusion quality assessment is conducted through the whole objects of data set. In the first step, initial panchromatic and multi spectral images are introduced to fusion engine and results in new pan-sharpen image. After generating fused image, the process of evaluating fusion quality based on new strategy is implemented through next three phases. The basic processing units of object-level image fusion quality assessment are image segments, known as image objects, not single pixels. In order to extract image objects, multi resolution image segmentation is carried out in a way that an overall homogeneous resolution is kept. In proposed strategy, based on bottom-up image segmentation, image objects are extracted. In numerous subsequent steps, smaller image objects are merged into bigger ones to minimize average heterogeneity of image objects. The heterogeneity criterion consists of two parts: a criterion for tone and a criterion for shape.

For the description of spectral and textural difference or color heterogeneity the sum of the standard deviations of spectral values in each layer weighted with the weights w_c for each layer are used:

$$h_c = \sum_c w_c \cdot \sigma_c \quad (5)$$

The shape criterion again consists of two sub-criteria for smoothness and compactness based on the following equation.

$$h_{shape} = w_{cmpt} \cdot h_{cmpt} + (1 - w_{cmpt}) \cdot h_{smooth} \quad (6)$$

The overall fusion value f is computed based on the spectral heterogeneity h_c and the shape heterogeneity h_{shape} as follows:

$$f = w \cdot h_c + (1 - w) \cdot h_{shape} \quad (7)$$

The weight parameter w , allows adapting the heterogeneity definition to the application. The scale parameter is the stop criterion for optimization process. Prior to the merging of

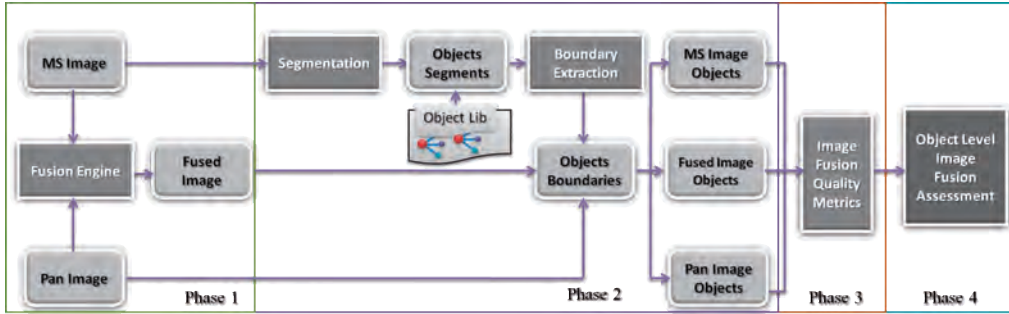


Fig. 1: Flowchart of proposed object level fusion quality assessment.

two adjacent objects, the resulting increase of heterogeneity f is calculated. If this resulting increase exceeds a threshold t determined by the scale parameter, $t = \mathcal{V}$ (scale parameter), then no further fusion will take place and the segmentation will stop. The larger the scale parameter, the more objects can be fused and the larger the objects grow. Details are to be found in (BENZ et al. 2004).

As we are looking for meaningful image objects, the initial multi-spectral image was selected as a reference image to extract image segments. Multi spectral image contains the lowest level of textural information and objects extracted from this image are identical or integration of some smaller objects in panchromatic and pan-sharpen images.

By performing image segmentation on source multi-spectral image, objects pulled out and boundaries of extracted image objects can be determined. These boundaries are projected to panchromatic image and produced fused image, and corresponding image objects are generated. By the time, considering object libraries, type of each image object, can be determined.

When corresponding image objects of all images (panchromatic and multi spectral image and the produced fused image) are determined, image quality metrics are computed for each case. So, quality of corresponding image objects will be inspected.

There are two scenarios for object level quality assessment: the type of objects and the effective size of objects in data set. In some applications, the users' purposes about fusion are to make progress and improve the identification potentiality of some specific objects,

such as buildings. The quality of these objects should not be less than a specified level of accuracy. In this case, despite the acceptable configuration of general quality of image, fusion process should satisfy a level of quality about specific objects. On the other hand, wide spread objects have more visual effects on pan-sharpen image users. Thus, another object level quality indicator is the evaluation of frequency of image objects pixels against the value of their image quality metric.

4 Experiments and Results

Proposed strategy is implemented and evaluated for quality assessment of high-resolution QuickBird image data over an urban area. The original panchromatic QuickBird has 0.61m pixel while the original multi spectral image has 2.4m pixel spatial resolution. Fused Quick-bird images generated based on wavelet based image fusion technique resulted in new images with 0.61 meter spatial resolution and three $B1, B2, B3$ (R,G,B) spectral bands (ZHENG et al. 2011). All three images of data set are presented in Fig. 2.

4.1 Pixel Level Image Fusion Quality Assessment

Pixel level quality assessment of obtained pan-sharpen image is done by computing SAM and UQI statistics for image fusion quality assessment. SAM index is computed for each image pixel of fused image with respect to corresponding multi spectral image pixel,

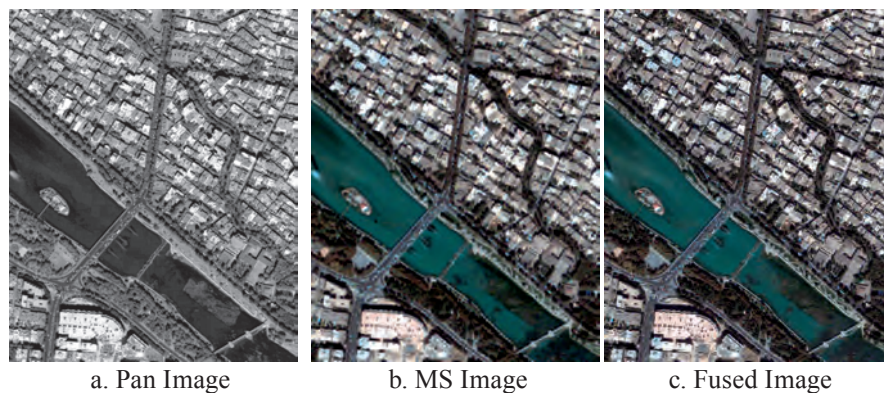


Fig. 2: QuickBird Data set.

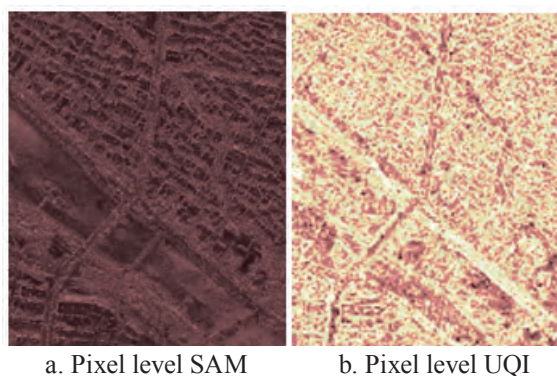


Fig. 3: Pixel level behavior of IFQM through data set.

based on Equation (4). To represent disparity of achieved SAM values, they are represented as pixels intensity values. Achieved image is depicted in Fig. 3a. By averaging the whole computed SAM indices yields global measurement of spectral distortion, and is presented in Tab. 1. This final averaged value is what is usually reported as fusion quality in most literatures. Moreover, to have a better perception of fusion behavior, not only the global SAM value, but also the Min, Max and STD values of computed SAM index of all image pixels are presented in Tab. 1. Additionally, UQI is used to inspect quality of achieved pan-sharpen image as a mono modal metric. This index is computed within a sliding patch with the size of 9 pixels. The mean of pan-sharpen three spectral bands is computed and compared to panchromatic image to evaluate the result of fusion process with respect to ini-

tial panchromatic image (P-I). Final value of UQI is achieved by averaging computed values of all patches. In order to illustrate UQI behavior, achieved UQI values for each image patch in three layers, R-R, G-G and B-B are averaged and obtained image is depicted in Fig. 3b.

Moreover, the final value of UQI index, achieved via averaging, and the Min, Max and STD values of achieved UQI in all image patches, are presented in Tab. 2. Based on the concept of mono modal metrics, they are evaluated for each band of image separately. Consequently, UQI results are presented as the average amount of achieved UQI values for all bands. But, since multi modal metrics treat the image as 3D data vector and compare the fused image only with the reference multi spectral image, SAM index results are restricted to only one layer. Inspecting results of

Tab. 1: Pixel level results of SAM.

Metric	Min/Max	Mean	STD
SAM	0/26	2.05	1.44

Tab. 2: Pixel level results of UQI.

Bands	Min/Max	Mean	STD
R-R	0/98	0.60	0.26
G-G	0/98	0.60	0.27
B-B	0/98	0.55	0.24
P-I	0/96	0.72	0.25

applying pixel level fusion quality assessment, it is clear that fusion function does not behave uniformly towards whole image.

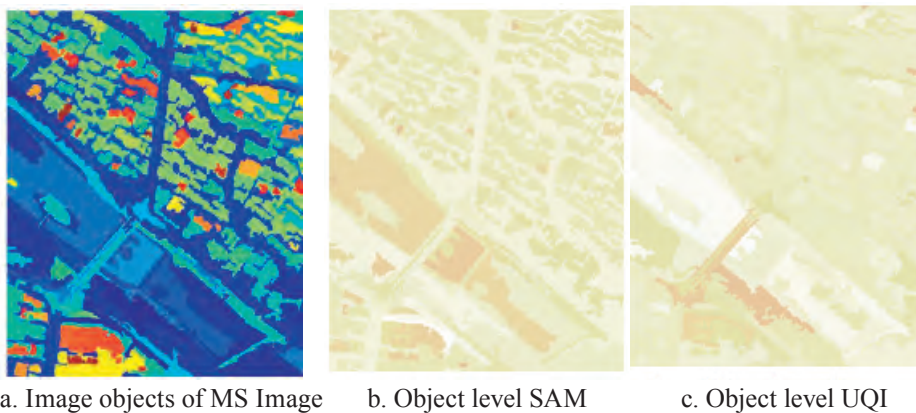
It is obvious that the average value for quality metric differs saliently from the min or max values and cannot comprehensively reflect quality of entire image. So, it is an emphasis on non-efficiency of traditional methods of evaluating fusion quality via a single value. Besides, it can be observed that image patches, defined using sliding window for evaluating UQI index, does not match the real image objects and cannot be reliable enough for quality assessment of pan-sharpen image objects. On the other hand, it is obvious that quality values, achieved via each quality metric are completely different. For example in case of SAM it ranges 0–3 while it ranges 0–1 for UQI quality metric. It is realized that there

is no individual reference for comparing the outcomes of applying different quality metrics in traditional pixel level fusion quality assessment. All disadvantages of traditional pixel level quality assessment hint to capability of object level fusion quality assessment for lessening these limitations.

4.2 Object Level Image Fusion Quality Assessment

In order to extract image objects, a multi resolution image segmentation method is performed based on the original multi spectral image. For implementation of segmentation, eCognition software system that provides multi resolution object-oriented image analysis is applied (BENZ et al. 2004). Through the segmentation procedure, the whole image is segmented and image objects are extracted based on adjustable criteria of heterogeneity in color and shape. Achieved segmented image via eCognition software is presented in Fig. 4a. By implementing image segmentation, 108 different objects are extracted each of which presents an individual image district.

By extracting boundaries of determined image objects and applying them on source panchromatic and pan-sharpen images, corresponding image objects in those imagery are extracted. When image objects extracted, fusion quality is determined for each image object based on SAM and UQI metrics. SAM index evaluated for all pixels of each image

**Fig. 4:** Extracted Image objects and Object level behavior of IFQM through data set.

Tab. 3: Object level results of SAM.

Metric	Min/Max	Mean	STD
SAM	.51/3.31	1.71	0.31

Tab. 4: Object level results of UQI.

Bands	Min/Max	Mean	STD
R-R	.60/97	0.80	0.07
G-G	.62/96	0.80	0.06
B-B	.56/95	0.77	0.07
P-I	.25/96	0.80	0.13

object and final value achieved through averaging of all. To show the fusion behavior over image objects, final SAM index for each image object are assigned as pixels intensities and illustrated in Fig. 4b. On the other hand, in case of UQI, each image segment is considered as image patch, so UQI index achieved for each image object directly applying Equation (2). Average amount of achieved UQI value for all three pan-sharpen image band with respect to bands of multi spectral image are assigned as pixel intensity values and illustrated in Fig. 4c.

The same as pixel level assessments, the achieved amount of metrics in each individual segment with the Min, Max, Mean and STD values of all segments are determined. Achieved results of both SAM index and UQI are presented in Tabs. 3 and 4.

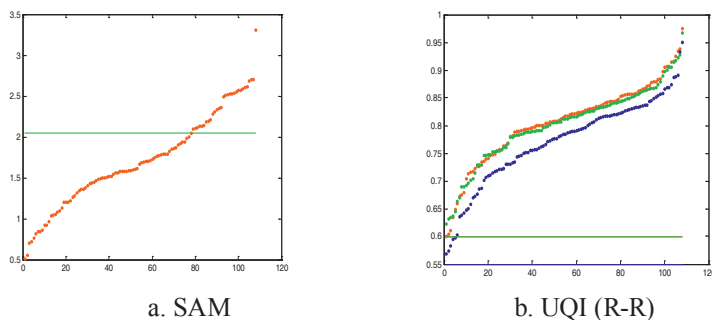
Tabs. 3 and 4 shows dissimilar statistical behavior of quality index in different image

objects for both situation of UQI (mono modal metric) and SAM (multi modal metric).

To assess object level fusion quality, the final results for each metric in all 108 image segments are sorted and visually illustrated to provide better view of fusion behavior (Fig. 5). Moreover, to provide a comparative view, all metrics evaluated based on the traditional pixel level strategy and illustrated. Results of applying SAM are presented in Fig. 5a. In case of UQI which is a mono modal metric, results are graphically presented in comparison with multi spectral (R-R, G-G, B-B) image (Fig. 5b). The quality metric values achieved traditionally are also plotted. Graphs depicted in Fig. 5 present image regions number (horizontal axis) versus resulted quality metric values of each region (vertical axis).

The figure clearly shows that the achieved quality in different image objects have a wide range of alteration in comparison with the achieved traditional value. The range of these variations is too large to be ignored. The UQI metric appears to behave differently not only in different image regions but also in different bands of images. Moreover, depicted diagrams insist on the claim of different fusion quality over different image object with different paternal behavior. It also holds the fact that it is not justified to ignore these variations and have a uniform view over the whole image data set while assessing image fusion quality.

In our experiments, the quality of objects categorized in three levels, high quality, mean quality objects and low quality objects (Fig. 6). Fig. 7 shows the frequency of image objects pixels to the value of their image quality metrics of SAM and UQI in the test area.

**Fig. 5:** Behavior of Object based IFQMs.

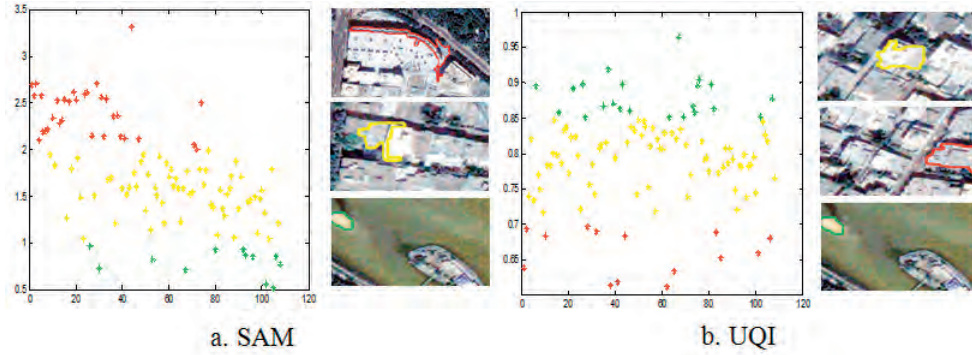


Fig. 6: Categorization of fusion quality in test area. a) SAM quality levels and three object samples for each level. b) UQI quality levels and three objects samples for each level.

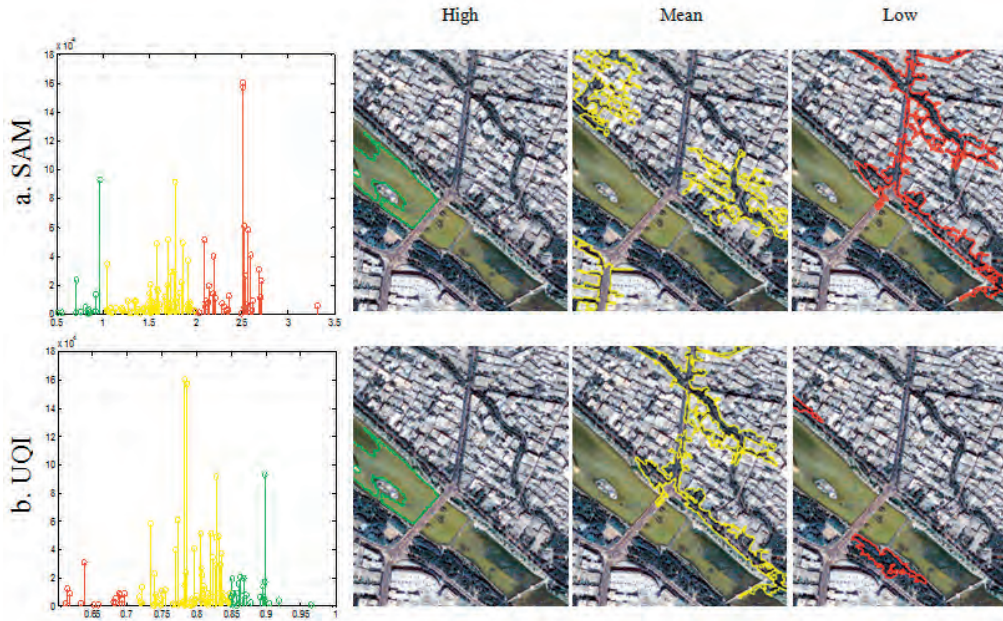


Fig. 7: Frequency of image objects pixels to the value of their image quality metrics of a) SAM and b) UQI in the test area and three largest objects for each level.

Conducted experiments and the obtained results show that fusion process does not behave uniformly towards the whole image. Having said that, it is not reliable to evaluate fusion quality of a pan-sharpen image just by a single value.

Although debated quality assessment metrics are apparently observed to be successful, in conformance with previously studied researches, using a pixel level strategy inevitably leads to evaluating image as a whole. This takes us just to a hazy general evaluation of

the image regardless of the quality of fusion concerning each object.

As in most applications, the processing is mainly focused on specific types of objects, using an object level strategy, image fusion could be more selectively and reliably evaluated due to the reduction of image space into target objects. For example, using an object library, it might be possible to provide the capability of assessing fusion quality for a specific object such as building, vegetation, etc.

In patch wise or locally computed metrics such as UQI, although it seems that a local patch wise strategy using a traditional pixel level is obtained, they fail to represent a local evaluation. This can be viewed in two angles. First, they miss to evaluate locally as patches are acquired in a routine manner, regardless of the regional relations between pixels and corresponding objects. Second, the averaging of the computed evaluation values of each patch results in a general value for whole image but no local assessment.

As shown in Fig. 6, it is observed that different image quality metrics show more behavioural conformity to each other when computed through an object level strategy rather than pixel level traditional one.

5 Conclusion

There is a wide range of image fusion quality metrics in literature which have been used in different applications and for variety of remote sensing images. In most experiments, these metrics are applied for pixel level fusion quality assessment. This means they evaluate fusion quality in whole image paying no attention to spatial and textural behaviors. This paper proposed an object level fusion quality assessment to model non-uniform behavior of image fusion process. Based on the proposed strategy, image fusion quality assessment is performed for each individual image objects autonomously. Using the high capabilities of this object level image fusion quality assessment strategy, one can solve most of the main problems of traditional pixel level strategies. However, this method still needs some more modifications in the field of definition of image objects which is used in recognition process. Moreover, incorporating of other image quality metrics could efficiently modify the potential of the proposed methodology. Besides, the quality of fusion process can be evaluated by the proposed method while all spectral bands of images are applied or for comparing different image fusion strategies, in future studies.

This means they evaluate global fusion quality in image paying no attention to available textural diversities in different objects which dictate different fusion behavior.

References

- ALPARONE, L., BARONTI, S., GARZELLI, A. & NENCINI, F., 2004: A Global Quality Measurement of Pan-Sharpener Multi-spectral Imagery. – *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* **1** (4).
- BENZ, U., HOFMANN, P., WILLHAUCK, G., LINGENFELDER, I. & HEYENEN, M., 2004: Multi-Resolution, Object-Oriented Fuzzy Analysis of Remote Sensing Data for GIS-Ready Information. – *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **58**: 239–258.
- DE CARVALHO, O.A. & MENESES, P.R., 2000: Spectral Correlation Mapper (SCM) – An Improvement on the Spectral Angle Mapper (SAM). – 9th JPL Airborne Earth Science Workshop, JPL Publication.
- CHEN, Y. & BLUM, R.S., 2005: Experimental Tests of Image Fusion for Night Vision. – 8th International Conference on Information Fusion.
- HOSSNY, M., NAHAVANDI, S. & CREIGHTON, D., 2007: A Quadtree Driven Image Fusion Quality Assessment. – 5th IEEE International Conference on Industrial Informatics: 419–424.
- LEUNG, L.W., KING, B. & VOHORA, V., 2001: Comparison of Image Data Fusion Techniques Using Entropy and INI. – *Asian Conference on Remote Sensing* **1**: 152–157.
- PIELLA, G. & HEIJMANS, H., 2003: A New Quality Metric for Image Fusion. – *IEEE International Conference on Image Processing*: 137–176.
- RANCHIN, T. & WALD, L., 2000: Comparison of Different Algorithms for the Improvement of the Spatial Resolution of Images, – 24th EARSeL Symposium Fusion of Earth data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed image.
- PETROVIC, V.S. & XYDEAS, C.S., 2003: Sensor Noise Effects on Signal-Level Image Fusion Performance. – *Information Fusion* **4** (3): 167–183.
- REYES, R.A., GUTIERREZ, M.J., FERNANDEZ, S., THOMAS, C., RACHIN, T. & WALD, L., 2004: Evaluation of the Quality of Quickbird Fused Products. – 24th symposium of the European Association of Remote Sensing laboratories: New strategies for European Remote Sensing.
- RIYABI, R., KLEINN, C. & FUCHS, H., 2009: Comparison of Different Image Fusion Techniques for Individual Tree Crown Identification Using Quickbird Images. – *ISPRS Hannover Workshop*.
- SHI, W., ZHU, C., TIAN, Y. & NICHOL, J., 2005: Wavelet-Based Image Fusion and Quality Assessment. – *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **6** (3–4): 241–251.
- SEETHA, M., MALLESWARI, B.L., MURALIKRISHNA, I.V., DEEKSHATULU, B.L. & NAGARATNA HEGDE, P.,

- 2007: Performance analysis of image fusion techniques by image segmentation. – Spatial data quality, www.itc.nl/issdq2007/proceedings/Postersess.
- THOMAS, C. & WALD, L., 2004: Assessment of the quality of fused products. – 24th symposium of the European Association of Remote Sensing laboratories: New strategies for European Remote Sensing.
- THOMAS, C. & WALD, L., 2006a: Analysis of Changes in Quality Assessment With Scales. – FUSION06.
- VAN DER MEER, F., 2005: The Effectiveness of Spectral Similarity Measures for the Analysis of Hyperspectral Imagery. – International Journal of Applied Earth Observation And Geoinformation **8**: 1–15.
- VIJAYARAJ, V., HARA, C.G.O. & YOUNAN, N.H., 2004: Quality Analysis of Pan-sharpened Images. – Geoscience and Remote Sensing Symposium **1**.
- WALD, L., 2000: Quality of High Resolution Synthesized Images: Is There a Simple Criterion? – International Conference on the Fusion of Earth Data.
- WANG, Z. & BOVIK, A.C., 2002: A Universal Image Quality Index. – IEEE Signal Processing Letters **9** (3).
- WANG, Z., BOVIK, A.C., SHEIKH, H.R. & SIMONCELLI, E.P., 2004: Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity. – IEEE Transactions on Image Processing **13** (4): 600–612.
- WANG, Z. & BOVIK, A.C., 2009: Mean Squared Error: Love It Or Leave It? – IEEE Signal Processing Magazine **26** (7): 98–117.
- XYDEAS, C.S. & PETROVIC, V., 2000: Objective Image Fusion Performance Measure. – Electronics Letters **36** (4): 308–309.
- ZHANG, Y., 2008: Methods for Image Fusion Quality Assessment – A Review, Comparison and Analysis. – The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **37** (B7).
- ZHENG, H., ZHENG, D., HU, X. & LI, S., 2010: Study on the Optimal Parameters of Image Fusion Based on Wavelet Transform. – Journal of Computational Information Systems **6** (1): 131–137.

Address of the Authors:

Prof. F. SAMADZADEGAN, F. DADRAS JAVAN, Department of Surveying and Geomatics, University College of Engineering, University of Tehran, Iran, North Amir abaad, Tel: +98 21 880088-41, Fax: -37, samadz@ut.ac.ir, fadarasjavan@ut.ac.ir.

Manuskript eingereicht: Dezember 2010
Angenommen: Februar 2011



Feature Evaluation for a Transferable Approach of Object-based Land Cover Classification Based on Ikonos and QuickBird Satellite Data

NILS WOLF, Bochum

Keywords: Random Forests, Feature Selection, QuickBird, Ikonos, Object-based Image Analysis

Summary: This contribution aims at revealing features that can be used for generic object-based land cover classification of Ikonos and QuickBird satellite data. On seven satellite scenes the Random Forest algorithm – a tree-based ensemble classifier – is applied as it provides an internal measure to obtain feature importance scores. This measure quantifies in how far a feature contributes to the reduction of entropy (here based on the Gain Ratio criterion) when constructing a tree. The features under investigation comprise textures and variances, obtained on an image segmentation level, and the brightness values of single bands, respectively their ratios and differences, obtained on pixel level. As an outcome, the features are ranked with respect to their robustness. Top-ranked are those features which show good overall performance on each of the seven scenes.

Zusammenfassung: Bewertung von Merkmalen für einen übertragbaren objektbasierten Ansatz zur Landbedeckungsklassifikation basierend auf Ikonos und QuickBird Satellitenbilddaten. Dieser Beitrag beschreibt ein Verfahren zur Bewertung von Merkmalen hinsichtlich ihrer Eignung für einen übertragbaren objektbasierten Ansatz zur Landbedeckungsklassifikation. Gesucht sind demnach Merkmale, welche sich gegenüber spezifischen Einflussfaktoren verschiedener Eingangsdaten – hier sieben Ikonos und QuickBird Szenen – robust verhalten. Die Bewertung erfolgt über die Induktion von Verbänden de-korrelierter Entscheidungsbäume, sogenannter Random Forests. Der Informationsgewinn einzelner Merkmale an den Knotenpunkten der Entscheidungsbäume wird durch das Gain Ratio Maß ermittelt und quantifiziert in der Aggregation über den Verbund die Wichtigkeit der Merkmale. Der zu untersuchende Merkmalsraum setzt sich aus Texturen und Varianzen auf Segmentierungsebene sowie Grauwerten einzelner Bänder (bzw. deren Kombination in Ratios und Differenzen) auf Pixelebene zusammen. Das Ergebnis dieser Arbeit ist eine Bewertung der Merkmale hinsichtlich ihrer datensatzübergreifenden Qualität.

1 Introduction

Land cover classification is a common remote sensing scenario and applied for many purposes, such as urban growth mapping, parameterization of hydrological or climate models, or mobile network planning. In recent years, an increasing number of optical very high resolution (VHR) satellite systems are put into operation, providing repetitively amounts of data which raises the need of automating their

interpretation. Given a common classification task, it is questioned in how far classification can be generic and robust to variances of the input provided by such VHR systems.

Ikonos and QuickBird share a nearly identical Kodak sensor system (JACOBSEN 2003) and deliver products with comparable spectral characteristics. The main difference of both systems lies in the spatial resolution capacities caused by different orbits. Regardless of the sensor system, in fact every scene is affected

by specific properties, such as atmospheric conditions, sun elevation or off-nadir angle. Furthermore, adapting a classification method to another study area further requires a stable semantic scheme and an even more generalizing, but though precise model. WOLF et al. (2010) propose a generic framework for object-based classification (rule-based expert system) which is adaptable to different Ikonos and QuickBird scenes by tuning a set of key-parameters (visual on-screen inspection). The present study aims at improving this framework by identifying features that yield good performance on different scenes as they are less affected by scene-specific conditions.

In order to measure the importance of features with respect to their robustness, they are evaluated separately on training data of seven Ikonos and QuickBird scenes with footprints across a highly urbanized region, the Ruhr Area, in Germany. Comparing and averaging the features' performances over the different training sets is assumed to reveal robust features that can be used for a generic object-based land cover classification framework. The importance scores are obtained by measuring in how far particular features contribute to the construction of decision boundaries applying a Random Forest (RF) classifier. RF are ensemble classifiers that induce a large number of de-correlated decision trees which give their votes for unknown instances.

The feature space under investigation is generated within an object-based environment. Object-based approaches for image analysis take advantage of a feature space extended beyond the n -dimensional matrix space of an image because a local neighborhood of pixels – created by image segmentation – can be utilized in order to obtain also variances, textures and further metrics (BENZ et al. 2004). In comparison to moving window approaches which include local neighborhoods as well, objects based on segmentation represent homogeneous image regions that are assumed to exhibit features which better describe the real-world entities (CASTILLA & HAY 2008).

This paper is organized as follows: In Sections 2 and 3, decision trees and the RF ensemble method are introduced. Section 4 describes how the feature importance measures – technically a by-product of the RF model in-

duction – is obtained. In Section 5, the method is applied for the investigation of two binary classification problems: firstly, the separation of built-up (i. e., buildings/roofs, pavements, and other artificial materials) from bare surfaces (e. g., rocks or exposed soils) and, secondly, the separation of water bodies and shadowed non-vegetation surfaces. For sake of simplicity, these categories are referred to in the following as: *built-up*, *bare*, *water* and *shadow*. For consistency of the land cover classification scheme, the class vegetation constitutes the complement class. In Section 6, the results are presented and discussed while Section 7 concludes the work.

2 Tree Induction

The most common decision tree recursively partitions a feature space by axis-parallel linear splits whereas the decision boundaries ideally enclose instances representing only one class. Prominent algorithms are ID3 and its successor C4.5 (QUINLAN 1986), or *Classification and Regression Trees* (CART – BREIMAN 1984). Trees are non-parametric classifiers; thus they do not rely on assumptions regarding the distribution of the data.

The RF classifier applied for this study utilizes a modified CART algorithm to construct the ensemble of trees. CART produces binary trees with univariate splits. The splits aim at reducing the impurity of the child nodes, which is evaluated by a best-split criterion. As best-split criterion, CART employs the Gini Index while the present study uses the Gain Ratio instead. The Gain Ratio measure tends to create smaller trees (QUINLAN 1986, MINGERS 1998) and led in some test runs of this study to slightly better performances.

The best-split criterion based on the Gain Ratio is derived in the following (KOHAVI 1999). Let $C = \{0, 1, \dots, a\}$ be the class attribute (here only C_0 and C_1 , e. g., *water* and *shadow*) and let S be a set of n training instances, attributed with p features; respectively, $S_i \{0, 1, \dots, b\}$ are partitions of S (here restricted to S_0 and S_1). Further, $RF(C_p, S)$ denotes the relative frequency of instances that belong to class C_i .

The entropy (Shannon) is a measure of uncertainty associated with a feature. For a discrete set of instances it is defined as:

$$H = -\sum_{i=a}^{i=1} RF(C_i, S) \log_2(RF(C_i, S)) \quad (1)$$

Imagine S to be arranged as a sequence, ordered with respect to a particular feature. The first binary split possible is the one after the first entry of the sequence, the second split after the second entry, and so on. The maximum number of splits is determined by $n-1 \cdot p$, resulting each time in two candidate partitions with its own entropy $H(S)$. The difference of entropy before and after the split is called Information Gain and defined as:

$$G(S, B) = H(S) - \sum_{j=1}^b \frac{|S_j|}{|S|} H(S_j) \quad (2)$$

where B denotes the test on a particular split.

Moreover, the Gain Ratio is introduced to normalize Information Gain by the number and the sizes of generated child nodes from a candidate split. The Gain Ratio is defined as $G(S, B)/P(S, B)$, where $P(S, B)$ denotes the intrinsic entropy:

$$P(S, B) = -\sum_{j=1}^b \frac{|S_j|}{|S|} \log_2 \left(\frac{|S_j|}{|S|} \right) \quad (3)$$

The test B which maximizes the Gain Ratio finally constitutes a particular node of a tree and the whole process is iterated for the child nodes, until pure leafs or other stopping criterions are reached.

3 Random Forests

Random Forests (RF), invented by BREIMAN (2001), have become popular as they are simple to tune and also applicable to high-dimensional problems with only few training instances (" $n < p$ "-problem) (HASTIE 2007). They show good predictive accuracy for problems with highly correlated features, which is relevant to this study that is based on multispectral satellite data and various correlating derivatives. Even though RF are known for

well dealing with high-order interactions (STROBL 2008), it is assumed that associating interactions in artificial features (such as band ratios) is advantageous for keeping decision rules simple. Furthermore, RF allow fast computation on large datasets and lead to accuracies comparable to the well approved boosting or support vector machine learners (BREIMAN 2001, DIAZ-URIARTE & ALVAREZ DE ANDRES 2005, HASTIE 2007).

RF belong to the category of ensemble classifiers which share the concept of constructing several base learners and combining their outputs to a committee with superior performance. Fully grown and unpruned trees have approximately no bias but they suffer from high variance. They are grown in a greedy manner and form unstable models which track every instance by a branch, hence even noise is memorized. By averaging over a group of de-correlated trees, RF counteract the variance problem while keeping a low bias (DIAZ-URIARTE & ALVAREZ DE ANDRES 2005). BREIMAN (2001) stated that overfitting is not an issue for this type of classifier.

The performance of RF highly depends on the de-correlation of the trees, which BREIMAN (2001) solves by combining his idea of bagging (BREIMAN 1996) with Ho's (1998) concept of random feature subspaces. Hereby, randomness is injected at several stages of the learning process. Firstly, bagging introduces random variation for the training datasets by bootstrap resampling. Given a training dataset S with n instances, bagging generates m new training datasets S_i by sampling instances from S uniformly and with replacement. Thus, a particular instance has the following probability of being in a dataset S_i :

$$\left(1 - \frac{1}{n}\right)^n \approx e^{-1} \approx 0.638 \quad (4)$$

A tree is fit to each bootstrap training set S_i , resulting in m de-correlated trees, while instances not belonging to S_i , about one third of the dataset, form the so-called out of bag (oob) data. The oob data constitutes an independent test set for each tree which can be used to estimate the prediction error without need for external tests, such as cross-validation. It can be stated that the error converges

as m increases. An empirical test about the setting of m is given in HASTIE et al. (2007).

A further injection of randomness comes from sub-sampling the feature space. At each node of a tree, a feature set p_s (with $p_s < p$) is drawn randomly and evaluated by the best-split-criterion. BREIMAN (2001) shows that small p_s (about $p^{0.5}+1$) yield good results because the prediction error largely depends on the trees' de-correlation.

4 Feature Scoring Based on Random Forests

Feature selection is a commonly applied pre-processing step in machine learning and aims at finding an efficient subset of features. Reducing the dimensionality can improve models, save computational costs or gain a better understanding of an underlying problem (GUYON et al. 2003). Feature selection approaches can be categorized in filter, wrapper and embedded methods, depending on their interaction with a classifier. Filter methods are cheap to obtain because they directly operate on the data. They assess features individually (e.g., by Gain Ratio, Fisher Score or Relief-F) and therefore suffer from ignoring the importance of a feature in presence of another. Wrapper methods evaluate different feature subspaces by the performances of an applied classifier. Generally, they provide good results, however alternating through combinations of features (e.g., by genetic algorithms, greedy forward selection or greedy backward elimination) as well as the mandatory repetitive performance estimation (e.g., by cross-validation) make wrappers computationally expensive. Embedded methods often provide a reasonable trade-off between quality and computational costs. They derive feature importance directly from a classification model (e.g., by using the weight vector in support vector machines).

In this study, an embedded method is used, based on the application of the RF classifier (similar as described in MENZE 2009). For each feature, an importance score is obtained by accumulating its Gain Ratio values over all nodes of the forest. Thus, the score describes the number but also the quality of the feature's

occurrences. By applying this method on the different input spaces of the seven satellite scenes, the features can be evaluated regarding their robustness. Good features would show a high average performance and – at the same time – no negative outlier for any of the tests.

5 Data and Application

5.1 Satellite Image Data

Fig. 1 gives an overview of the used satellite data, comprising three QuickBird (*Orthorectified*) and four Ikonos (*Standard Geometrically Corrected*) scenes with a total footprint size of 1130 km². The study site is located in the Ruhr Area, Germany. The images are characterized by manifold urban structures, adjacent to agricultural and some forested and (semi-)natural areas.

The metadata of the images, listed in Tab. 1, reveal some of the scene-specific properties which are just a few of the factors that potentially complicate the adaption of image analysis rules from one scene to another. The acquisition dates vary between April and September, the sun elevation angles between 41 and 51 degrees and the off-nadir angles between 8 and 28 degrees. Furthermore, the images comprise different pixel sizes, i.e., 1 m (panchromatic)/4 m (multispectral) for Ikonos and 60 cm/2.4 m for QuickBird.

The image data pool is further extended by pansharpened datasets, using the *Subtractive Resolution Merge* (SR-Merge) and the *Principle Component Resolution Merge* (PC-Merge) algorithms, both implemented in the *ERDAS Imagine 10* software package.

5.2 Sample Selection

Given is a land cover classification task (referred to the urban land cover classification scheme by HEROLD (2004)) with the focus on two binary classification problems which are frequently reported as the core problems: built-up vs. bare and water vs. shadow (on non-vegetation surfaces). Accordingly, training samples are collected on each scene by the

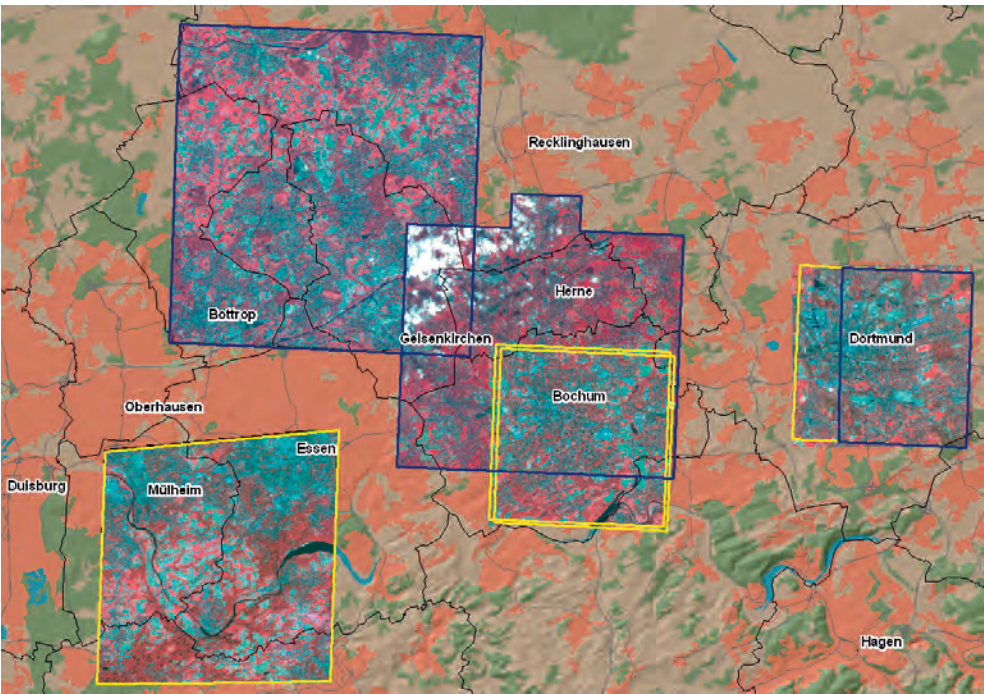


Fig. 1: The study site, Ruhr Area, and the coverage by satellite data, comprising four Ikonos scenes (framed in yellow) and three QuickBird scenes (framed in blue). Each footprint consists of the original multispectral and panchromatic layers, plus two further 4-layer stacks created by pan-sharpening (PC-Merge and SR-Merge). Background map: SRTM hillshade, CORINE Land Cover (CLC2000), basemap (districts and highways).

Tab. 1: Metadata of the Ikonos and QuickBird satellite scenes.

Satellite Scene	GSD [m]	Clouds [%]	Off-nadir [degree]	Sun Elev. [degree]	Acquisition [M/D/Y]
Ikonos (Bochum)	1.0 / 4.0	1	27.9	48.8	04/21/2005
Ikonos (Bochum)	1.0 / 4.0	0	26.2	42.7	09/11/2008
Ikonos (Dortmund)	1.0 / 4.0	1	22.7	41.7	04/02/2007
Ikonos (Essen - Mülheim)	1.0 / 4.0	0	23.3	44.5	09/06/2005
QuickBird (Bochum)	0.6 / 2.4	14	13.3	51.1	08/16/2009
QuickBird (Dortmund)	0.6 / 2.4	0	7.6	51.2	04/25/2006
QuickBird (Gelsenkirchen - Bottrop)	0.6 / 2.4	0	13.5	42.2	09/10/2004

labeling of image objects. The image objects are created using the Multiresolution Segmentation (BAATZ & SHÄPE 2000, implemented in eCognition Developer 8) on the panchromatic layers with the following parameter setting: scale = 20/(pixel size[m] * 1.4); shape = 0.2; compact: 0.8. The scale parameter value is normalized by the pixel size in order to obtain

objects of comparable size (Ikonos and QuickBird provide different spatial resolutions). In a subsequent step, small objects of less than 10 pixels are merged into their spectrally most similar neighbor object. However, no merge is conducted if none of the neighbors offer a considerable similarity (here the difference of the spectral mean values is restricted to a maxi-

mum of 50). The remaining small objects of less than 10 pixels are excluded from the sampling process as they are at risk to exhibit statistically less reliable or even undefined feature values. The overall premise guiding the process of object creation is to avoid under-segmentation, i. e., objects representing more than one class of interest, but to ensure at the same time that objects are large enough to exhibit significant attributes.

Obligatory, land cover mapping raises questions about dichotomies and semantics of classes, especially for crisp classification schemes. Land cover categories are formed out of a continuum of different materials and always remain vague. The question is about the trade-off between reality, their projection into image data, and the highly subjective conceptual reality of the thematic background. In this study, semantic highly ambiguous objects are not considered for the sampling because they are more likely to inject noise than to supply the indeed valuable class extremes. Here, examples for semantically highly ambiguous

objects are: very marshy or even silted up water bodies mainly covered by plants, swimming pools, or farm tracks where the pavement is only partially visible.

5.3 Features

61 features are generated on an image object level and 65 features on pixel level (for an overview see Tab. 4). The former feature set contains textures (after HARALICK 1973) and variances while the latter represents the digital numbers of individual layers, respectively their combinations (e. g., ratios and differences). Projecting the training regions also on a pixel level brings several advantages: Firstly, pixel values and their distribution remain pure as they are not averaged per object. Secondly, there is no need to counteract the under-representation of homogeneous image regions which tend to be aggregated in larger objects. Furthermore, the number of training instances increases significantly.

Tab. 2: Formal description of features.

Feature	Description	
GLCM Contrast	$\sum_{i,j=0}^{N-1} \frac{P_{ij}}{1 + (i - j)^2}$	i: row number j: column number P_{i,j}: normalized value in the cell i,j N: number of rows or column V_k: normalized grey level difference vector V(k) = SUM(i,j=0,N-1 and i-j =k) P(i,j) B₁: BLUE band B₂: GREEN band B₃: RED band B₄: NIR band Ratios: B _x / B _y (e.g., vis / B2)
GLCM Homogeneity	$\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{ij} (i - j)^2$	
GLCM Entropy	$\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} (-\ln P_{i,j})$	
GLDV Entropy	$\sum_{k=0}^{N-1} V_k (-\ln V_k)$	
ndvi	$(B_4 - B_3) / (B_4 + B_3)$	
ndwi	$(B_4 - B_2) / (B_4 + B_2)$	
bndvi	$(B_4 - B_1) / (B_4 + B_1)$	
sd	$(B_1 - B_2)^2 + (B_2 - B_3)^2 + (B_3 - B_4)^2$	
brightness	$B_1 + B_2 + B_3 + B_4$	
vis	$B_1 + B_2 + B_3$	
ssi	$\text{abs}(B_1 + B_3 - 2B_2)$	

A formal description for the texture features as well as ratios, differences and other indices is provided in Tab. 2. All feature values are calculated in the software *eCognition Developer 8* and exported to a spreadsheet format.

5.4 Feature Importance Analysis

The RF algorithm and the associated feature scoring used in this work are implemented in the software *RapidMiner 5*. The RF are constructed as described in Sections 2 and 3. The remaining tuning parameters are set as follows: The random subspaces p_s are restricted to $p^{-0.5}+1$ features and the number of trees (all fully grown) constituting a forest is set to 200, which should approximate an equal representation of features in the total of p_s .

For each of the seven training sets, feature scores are obtained on four scenarios as both binary classification problems are treated separately and, moreover, further split in individual runs for the object level and pixel level feature spaces. Thus, each training set leads to four preliminary results where features are ranked according to their accumulated Gain Ratio values. These scores are normalized ($[0-1]$) to avoid a bias towards training sets where classes are more easily separable. The overall importance is obtained by averaging the normalized scores obtained on the different training sets – again with regard to the four scenarios.

The method is applied in two stages. In the first stage, scores are obtained by restricting the feature spaces to the pansharpened images. In doing so, both pansharpening methods

are evaluated against each other by a direct competition. To confirm this outcome, the oob error is calculated on scenarios with feature spaces restricted to the particular pansharpening method. Features stemming from the inferior pansharpened dataset are excluded from any further investigation. Consequently, in the second stage, scores are obtained on features stemming from the original images and the superior pansharpening layers.

The problem of class imbalances is treated by down-sampling the majority class. Object level scenarios are represented by at least ≈ 200 instances per class and pixel level scenarios by at least ≈ 2800 . Class imbalances are a frequently reported problem for many classifiers and also RF are concerned by this as they are constructed to minimize the overall error, which can lead to poor accuracies for the minority class (CHEN 2004).

6 Results and Discussion

6.1 Pansharpening Competition

Tab. 3 shows the results of the pansharpening competition by comparing the scores (quotient: *PC-Merge/SR-Merge*) according to training sets and scenarios. In the majority of the cases the PC-Merge outperforms the SR-Merge, resulting in an overall average quotient of 1.074. The oob error for feature spaces that exclusively refer to one of the pansharpened sets confirms this tendency. The PC-Merge scenarios obtain an average error of 0.155 in comparison to 0.178 for the SR-Merge scenarios.

Tab. 3: Values obtained by dividing the PC-Merge scores by the SR-Merge scores, with respect to the four scenarios (*ws* = *water* vs. *shadow*, *bb* = *built-up* vs. *bare*) and the seven training sets (denoted by their corresponding satellite scenes: *IK* = *Ikonos*, *QB* = *QuickBird*). Green cells indicate a superior performance by the PC-Merge (i. e., cell value > 1).

	QB_a	QB_b	QB_c	IK_a	IK_b	IK_c	IK_d	Average
ws_ob	1.270	1.042	1.270	0.893	1.073	1.033	1.198	1.111
ws_px	0.876	0.891	1.071	0.781	1.564	1.012	1.096	1.041
bb_ob	1.120	1.201	0.994	1.045	1.101	1.214	1.144	1.117
bb_px	1.183	1.151	0.983	0.923	1.003	0.847	1.101	1.027
Average	1.112	1.071	1.079	0.910	1.185	1.026	1.135	1.074

Tab. 4: Overall feature importance scores (OFIS), calculated by averaging the results obtained on the seven training sets. The prefix *ps_* denotes the PC-Merge layers; if no prefix is given, the original multispectral and panchromatic layers are addressed.

built-up vs bare				water vs shadow			
pixel level		object level		pixel level		object level	
feature	OFIS	feature	OFIS	feature	OFIS	feature	OFIS
vis/red	.681	Standard deviation nir	.817	ps_blue/ps_green	.679	GLCM Homogeneity ps_blue	.702
vis/nir	.552	Standard deviation blue	.664	ps_blue/ps_nir	.614	Standard deviation green	.473
bndvi	.548	Standard deviation ps_nir	.649	bndvi	.571	Standard deviation blue	.462
blue/red	.533	Standard deviation ps_blue	.600	ndwi	.560	GLDV Entropy ps_blue	.457
ps_vis/ps_green	.528	Standard deviation pan	.539	sd	.555	Standard deviation nir	.442
ps_vis/ps_red	.528	Standard deviation green	.524	ps_vis	.551	GLCM Homogeneity ps_red	.431
blue/green	.523	GLCM Entropy ps_green	.466	green/nir	.550	GLDV Entropy ps_red	.403
Mean ps_blue	.499	GLCM Entropy ps_red	.461	ps_vis/ps_nir	.550	GLCM Contrast ps_blue	.402
green/red	.474	GLDV Entropy ps_nir	.444	ps_vis/ps_green	.547	Standard deviation red	.400
vis/blue	.467	GLCM Homogeneity ps_nir	.432	vis/nir	.545	GLCM Contrast ps_nir	.399
ndwi	.449	GLCM Homogeneity green	.432	ps_sd	.541	GLCM Homogeneity ps_green	.380
ps_sd	.436	GLCM Homogeneity ps_green	.431	blue/red	.526	GLDV Entropy ps_nir	.359
ps_green/ps_red	.434	GLDV Entropy ps_red	.406	ps_ndwi	.506	GLCM Contrast nir	.358
ps_vis/ps_nir	.425	GLCM Contrast pan	.406	ps_ndvi	.492	Standard deviation ps_blue	.350
ps_blue/ps_nir	.420	GLCM Contrast ps_nir	.403	ps_green/ps_red	.466	Standard deviation ps_nir	.350
green/nir	.418	GLCM Homogeneity nir	.395	ps_green/ps_nir	.463	GLCM Entropy nir	.349
ndvi	.417	Standard deviation red	.391	ps_bndvi	.418	Standard deviation pan	.343
blue/nir	.417	GLCM Homogeneity red	.386	blue/nir	.411	GLCM Homogeneity pan	.327
ps_ssi	.416	GLDV Entropy ps_blue	.379	vis/blue	.409	GLCM Homogeneity ps_nir	.317
vis/green	.388	Standard deviation ps_green	.376	ps_vis/ps_red	.404	GLCM Contrast green	.296
ps_bndvi	.383	GLCM Homogeneity ps_blue	.373	ssi	.391	GLCM Entropy blue	.278
ps_blue/ps_red	.365	GLDV Entropy red	.343	green/red	.375	GLCM Contrast red	.271
Mean ps_green	.346	GLCM Contrast red	.342	ps_blue/ps_red	.365	GLCM Entropy ps_green	.259
sd	.340	GLCM Contrast blue	.341	ndvi	.360	GLCM Entropy ps_nir	.250
ps_vis	.337	GLCM Contrast green	.338	vis/green	.330	GLDV Entropy ps_green	.250
ps_green/ps_nir	.335	GLCM Contrast ps_green	.337	ps_vis/ps_blue	.326	GLCM Homogeneity blue	.238
ps_blue/ps_green	.332	GLCM Contrast nir	.333	vis/red	.313	GLCM Homogeneity nir	.233
Mean ps_nir	.323	GLCM Contrast ps_blue	.331	Mean ps_red	.308	GLCM Homogeneity green	.227
ps_vis/ps_blue	.321	GLDV Entropy green	.328	ps_ssi	.307	Standard deviation ps_red	.220
ps_ndwi	.317	GLCM Entropy ps_blue	.327	brightness	.296	GLCM Homogeneity red	.217
ps_ndvi	.315	GLDV Entropy pan	.326	blue/green	.288	GLCM Entropy ps_red	.215
brightness	.290	GLCM Entropy green	.319	ps_brightness	.285	GLCM Entropy pan	.208
vis	.263	GLDV Entropy blue	.315	Mean ps_nir	.261	GLCM Contrast pan	.207
ps_brightness	.259	GLDV Entropy ps_green	.314	Mean ps_blue	.259	GLCM Entropy green	.207
ssi	.249	GLCM Homogeneity blue	.303	Mean pan	.247	GLCM Contrast blue	.202
Mean blue	.241	GLCM Entropy nir	.285	Mean nir	.247	GLCM Entropy ps_blue	.184
Mean pan	.240	GLCM Entropy pan	.273	vis	.227	GLDV Entropy nir	.181
Mean nir	.188	GLDV Entropy nir	.267	Mean ps_green	.193	Standard deviation ps_green	.179
Mean red	.170	GLCM Homogeneity ps_red	.257	Mean green	.172	GLCM Entropy red	.160
Mean green	.140	Standard deviation ps_red	.253	Mean red	.165	GLCM Contrast ps_red	.151
Mean ps_red	.088	GLCM Entropy ps_nir	.246	Mean blue	.133	GLCM Contrast ps_green	.149
		GLCM Entropy blue	.237			GLDV Entropy pan	.139
		GLCM Entropy red	.215			GLDV Entropy red	.094
		GLCM Contrast ps_red	.208			GLDV Entropy blue	.076
		GLCM Homogeneity pan	.200			GLDV Entropy green	.074

6.2 Overall Importance Scores – Robust Features

Tab. 4 ranks the features by their overall importance scores (averaged over the results of the different training sets). The preliminary results obtained on the individual training sets though can be important when also considering a minimum score criterion, i. e., a feature with a fair average performance but with one poor result on any of the scenes might not be

seen as robust. The oob error estimates for all RF models are below 0.38, with an average of 0.09 for the *water* vs. *shadow* scenarios and 0.16 for the *built-up* vs. *bare* scenarios.

Scenario *built-up* vs. *bare*, pixel level: The feature *vis/red*, calculated by $(BLUE\ band + GREEN\ band + RED\ band)/RED\ band$, obtains the highest score. It refers to pigment contents of the visual spectrum and seems to address the separation of rather bluish urban

materials (e. g., asphalt, tar, concrete or gray shingle roofs) from the rather reddish tones of nun-urban bare surfaces (dark brown irrigated acres or strong reflecting sandy soils on construction and dump sites). Furthermore, it can be noted that the most discrimination stems from the lower resolution multispectral bands (here the four best-ranked features are based on the 2.4 respectively 4.0 m resolution multispectral layers).

Scenario built-up vs. bare, object level: This scenario unambiguously votes for standard deviation features which obtained higher scores than textures based on GLCM and GLDV. The greatest separability stems from *Standard deviation nir*, leaving some gap to the next best-ranked *Standard deviation blue*.

Scenario water vs. shadow, pixel level: In contrast to the object-based scenario, the discrimination is foremost supplied by the pan-sharpened layers: the features *ps_blue/ps_nir* and *ps_blue/ps_green* are best-ranked. This result hints at the mixed pixel problem of the lower resolution multispectral layers, which becomes relevant for small-sized entities of a few square meters, here numerous shadows, mainly caused by buildings. Furthermore, some bias might result from the segmentation of the reference map which is created on high-resolution layers; thus the higher resolution layers are more likely to exhibit strong features. It has to be noted that the features *ps_blue/ps_green* and *ps_vis/ps_nir* (forth ranked) have a negative performance outlier with a normalized score below 0.1.

Scenario water vs. shadow, object level: For this scenario, the texture features significantly contribute to the classification. The feature *GLCM Homogeneity ps_blue* obtains the highest score by far.

According the pixel level scenarios, it can be stated that ratios and differences, i. e., features that incorporate the interaction of layers, achieves the highest scores. This does not necessarily imply that a RF classifier without such artificial features would perform worse. But it shows that a good performance can be obtained on a shorter way, literally described for a greedy tree. For the purpose of a generic framework for land cover classification, a

small set of features is preferable as it leads to decision rules that are simpler and better to tune.

7 Conclusion

The development of rule-based expert systems for classification is often time consuming as rules are developed by forward or backward chaining, usually accompanied by trials and errors. This process requires knowledge about the data and the underlying problem and lacks of an explicit theoretical grounding (such as provided by supervised methods). This work aims at supporting the stage of rule set development by identifying robust features for object-based land cover classification.

A multivariate feature importance analysis – based on the Random Forest classifier – has been applied on training sets of several Ikonos and QuickBird satellite scenes in order to reveal features that show a good overall performance. The method has been conducted for two common problems in land cover classification, namely the separation of *water* from *shadow* and *built-up* from *bare* surfaces.

The outcome of this study can be used to develop/improve a generic object-based land cover classification framework (rule-based expert system) by incorporating a subset of the top-ranked features. However, so far it has not been evaluated how those top-ranked features work in collaboration and how many of them are required to obtain good results. Those questions could be addressed in further research.

References

- BAATZ, M. & SCHÄPE, A., 2000: Multiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. – *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII*: 12–23.
- BENZ, U., HOFMANN, P., WILLHAUCK, G., LINGENFELDER, I. & HEYNEN, M., 2004: Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. – *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **58**: 239–258.

- BREIMAN, L., 2001: Random Forests. – *Machine Learning* **45** (1): 5–32.
- BREIMAN, L., FRIEDMAN, J.H., OLSHEN, R.A. & STONE, C.J., 1984: *Classification and Regression Trees*. – Wadsworth and Brooks/Cole, Monterey, USA.
- CASTILLA, G. & HAY, G.J., 2008: Image objects and geographic objects. – *Object-Based Image Analysis. Spatial Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications*: 91–110; Springer-Verlag, Berlin.
- CHEN, C., LIAW, A. & BREIMAN, L., 2004: Using Random Forest to Learn Imbalanced Data. – Tech. Report, www.stat.berkeley.edu/tech-reports/666.pdf.
- DIAZ-URIARTE, R. & ALVAREZ DE ANDRES, S., 2005: Variable selection from random forests: application to gene expression data. – Tech. Report, ligarto.org/rdiaz/Papers/rfVS/rfVarSel.pdf.
- GUYON, I. & ELISSEEFF, A., 2003: An Introduction to Variable and Feature Selection. – *Journal of Machine Learning Research* **3**: 1157–1182.
- HARALICK, R.M., SHANMUGAM, K. & DINSTEN, I., 1973: Textural Features for Image Classification. – *Transactions on Systems, Man and Cybernetics* **3** (6): 610–621.
- HASTIE, T., TIBSHIRANI, R. & FRIEDMANN, J., 2009: *The Elements of Statistical Learning. Data Mining, Inference, and Prediction*. – Second Edition; Springer-Verlag, New York.
- HEROLD, M., ROBERTS, D.A., GARDNER, M.E. & DENNISON, P.E., 2004: Spectrometry for urban area remote sensing - Development and analysis of a spectral library from 350 to 2400 nm. – *Remote Sensing of Environment* **91**: 304–319.
- HO, T.K., 1998: The Random Subspace Method for Constructing Decision Forests. – *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **20** (8): 832–844.
- JACOBSEN, K., 2003: Geometric Potential of IKONOS- and QuickBird-Images. – *Photogrammetric Week 2003*, Germany, on CD.
- KOHAVER, R. & QUINLAN, R., 1999: Decision Tree Discovery. – *Handbook of Data Mining and Knowledge Discovery*: 267–276; Oxford University Press, New York, USA.
- MENZE, B.H., KELM, M., MASUCH, R., HIMMELREICH, U., BACHERT, P., PETRICH W. & HAMPRECHT, F.A., 2009: A comparison of random forest and its Gini importance with standard chemometric methods for the feature selection and classification of spectral data. – *BMC Bioinformatics* **10** (213).
- MINGERS, J., 1989: An Empirical Comparison of Selection Measures for Decision-Tree Induction. – *Machine Learning* **3**: 319–342.
- QUINLAN, J.R., 1986: Induction of Decision Trees. – *Machine Learning* **1**: 81–106.
- STROBL, C., BOULESTEIX, A.-L., KNEIB, T., AUGUSTIN, T. & ZEILEIS, A., 2008: Conditional variable importance for random forests. – *BMC Bioinformatics* **9** (307).
- WOLF, N., THUNIG, H. & KALKAN, K., 2010: Extraction of potential areas for inner-urban development. – Elsevier Editorial System for International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation (manuscript submitted).

Address of the Author:

MSc Geography NILS WOLF, Ruhr-Universität Bochum, Geographisches Institut, D-44801 Bochum, Tel.: +49-234-32-23380, Fax: -14180, e-mail: nils.wolf@rub.de

Manuskript eingereicht: Februar 2011
Angenommen: März 2011



Integrierte Echtzeit-Visualisierung von massiven 3D-Punktwolken und georeferenzierten Texturdaten

RICO RICHTER & JÜRGEN DÖLLNER, Potsdam

Keywords: 3D Point Clouds, LiDAR, Point-based Rendering, Out-of-Core Visualization

Summary: *Integrated real-time visualization of massive 3D point clouds and geo-referenced texture data.* We present a technique that enables the integrated real-time visualization of massive 3D point cloud data in combination with geo-referenced texture data. Both represent essential geo data categories that become more and more applied due to increasing availability and decreasing costs generated by airborne and mobile scanning systems. The massivity of the generated data poses challenges both for algorithmic issues and hardware resources. The efficient processing and real-time visualization require out-of-core algorithms and LOD structures. The proposed out-of-core and LOD concept for unlimited large 3D point cloud data enables the real-time visualization of that data combined with geo-referenced texture data such as digital aerial images. This approach allows us to attribute arbitrary geo-referenced thematic information to the 3D point cloud data. This way, objects and regions cannot only be geometrically, but also thematically be presented, explored, and analyzed. The data is prepared in a preprocessing step and transferred into a spatial LOD structure, which is used by the real-time 3D point-based rendering technique. The technique can be used to develop interactive 3D analysis tools and simulation techniques that can directly and efficiently access raw 3D point clouds data.

Zusammenfassung: Dieser Beitrag stellt ein Verfahren vor, das die integrierte Echtzeit-Visualisierung von massiven 3D-Punktwolkendaten zusammen mit georeferenzierten Texturdaten ermöglicht. Beides sind wesentliche Kategorien von Geodaten, die insbesondere aufgrund ihrer wachsenden Verfügbarkeit und sinkender Kosten, generiert mit flugzeuggestützten oder mobilen Scan-Systemen, zunehmend Einsatz finden. Die Massivität der entstehenden Daten stellt eine Herausforderung sowohl für die Algorithmik wie auch für die Hardware-Ressourcen dar. Um die Daten effizient verarbeiten und in Echtzeit visualisieren zu können, werden sog. Out-of-Core-Algorithmen und Level-of-Detail-Strukturen benötigt. Das vorgestellte Out-of-Core- und LOD-Konzept für unbeschränkt große 3D-Punktwolkendaten ermöglicht deren Echtzeit-Visualisierung zusammen mit georeferenzierten Texturdaten, z.B. digitalen Luftbildern. Dieser Ansatz erlaubt es, 3D-Punktwolkendaten in der Visualisierung mit beliebigen georeferenzierten thematischen Information zu attributieren, so dass z.B. Objekte und Bereiche nicht nur geometrisch, sondern auch thematisch präsentiert, exploriert und analysiert werden können. In einem Vorverarbeitungsschritt werden dazu die Daten aufbereitet und in eine räumliche LOD-Struktur überführt, auf der die echtzeitfähige, punktbasierte 3D-Rendering-Technik operiert. Mit dem Ansatz wird es möglich, interaktive 3D-Analyse-Werkzeuge und Simulationsverfahren zu realisieren, die direkt und effizient auf 3D-Punktwolkenrohdaten zugreifen.

1 Einleitung

3D-Punktwolkendaten finden eine wachsende Verwendung in nahezu allen Bereichen, die zu einem bestimmten Zeitpunkt eine exakte Erfassung der räumlichen Strukturen, insbeson-

dere der Oberflächenstrukturen, benötigen. Dabei kommen neben flugzeug- und satellitengestützten Erfassungssystemen (z.B. LiDAR) zunehmend auch stationäre Scan-Systeme zum Einsatz. Nicht nur durch die Größe des Erfassungsgebietes, sondern auch durch

steigende Auflösung, Präzision und Geschwindigkeit bei der Erfassung entstehen so massive Datenmengen.

3D-Punktwolkendaten repräsentieren insbesondere in den Bereichen Planung, Konstruktion und Monitoring eine grundlegende Geodatenquelle. Sie haben vielfältige Anwendungen, z. B. zur Ableitung von 3D-Bauwerksmodellen, 3D-Geländemodellen (DGM), 3D-Oberflächenmodellen (DOM), 3D-Umgebungsmodellen oder 3D-Infrastrukturelementen. Deshalb werden 3D-Punktwolkendaten häufig als Ausgangsbasis für die Erstellung, Aufbereitung und Fortführung von virtuellen 3D-Stadtmodellen genutzt (BRENNER 2005, ZHOU et al. 2008, LAFARGE et al. 2010). Ergänzt werden virtuelle 3D-Stadtmodelle bzw. allgemeine 3D-Raummodelle im Allgemeinen mit digitalen, georeferenzierten Fotodaten, z. B. in Form von Luftbildern oder terrestrisch bzw. aus Schrägluftbildern abgeleitete Fassadenaufnahmen (FRÜH et al. 2004). In geovirtuellen 3D-Umgebungen (Geovirtual 3D Environments, GeoVEs) repräsentieren digitale, georeferenzierte Fotodaten eine grundlegende Datenkategorie für die photorealistische bzw. wirklichkeitsnahe Ausgestaltung (TANNER et al. 1998, MACEACHREN et al. 1999, DÖLLNER et al. 2000).

Die Echtzeit-Visualisierung von 3D-Punktwolkendaten ist eine grundlegende Anforderung, um diese Daten zu verwalten und zu nutzen. So ist z. B. eine Qualitätskontrolle des Datenbestandes erforderlich, indem alle erfassten Daten schnell und vollständig visualisiert und somit durch den Nutzer exploriert werden können. Insbesondere müssen hierbei die 3D-Punktwolkendaten auf Vollständigkeit, Genauigkeit und Deckungsgenauigkeit der einzelnen Flugstreifen überprüft werden, bevor eine aufwändige Weiterverarbeitung durchgeführt wird. Für die Visualisierung ist es darüber hinaus erforderlich, dass weitere georeferenzierte Daten, wie z. B. digitale Luftbilder, topographische Karten oder thematische Karten, nahtlos in die Visualisierung einbezogen werden können, z. B. indem sie als grafische Attribute den 3D-Punktwolken zugeordnet werden.

In diesem Beitrag stellen wir ein Verfahren vor, das massive, in der Größe konzeptionell unbeschränkte 3D-Punktwolkendaten zusam-

men mit georeferenzierten Texturdaten in Echtzeit visualisiert. Die Größe der Daten ist in der Praxis lediglich durch die Kapazität der verfügbaren Speichermedien limitiert. Das Verfahren baut dazu in einem Vorverarbeitungsschritt eine LOD-Datenstruktur auf, die einen effizienten Zugriff auf die 3D-Punktwolke in unterschiedlichen Auflösungen ermöglicht. Eine darauf abgestimmte punktbasierte 3D-Renderingtechnik operiert auf dieser LOD-Datenstruktur und wählt dabei sicht- und qualitätsabhängig für jeden Raumbereich entsprechend aufgelöste 3D-Teilpunktwolken aus. Die Aktualisierung eines zugeordneten Cache übernimmt ein separater Thread, so dass die Cache-Aktualisierung bzw. das Nachladen der LOD-Daten die Interaktivität des Verfahrens nicht beeinflusst. Die vollständige, echtzeitfähige und von Hardware-Ressourcen unabhängige Visualisierung ermöglicht es, dass sich Nutzer interaktiv in massiven 3D-Punktwolken unabhängig von deren Datenmenge bewegen können; die Integration von georeferenzierten Texturdaten erlaubt es zusätzlich die 3D-Punktwolke grafisch zu attributieren.

Das vorgestellte Verfahren ermöglicht allgemein die Realisierung interaktiver Analysefunktionen, Simulationstechniken und Explorationswerkzeuge, die direkt und effizient auf massive 3D-Punktwolkenrohdaten Zugriff erhalten. So können z. B. 3D-Punktwolkendaten vor weiterer Verarbeitung durch 3D-Stadtmodellwerkzeuge visuell evaluiert werden und es lassen sich zielgerichtet 3D-Datenbestände aktualisieren (GRÖGER & PLÜMER 2009), indem bestehende Geodaten zusammen mit den neu erfassten 3D-Punktwolkendaten visuell untersucht und verglichen werden (RICHTER & DÖLLNER 2010b).

Im Folgenden werden verschiedene Rendering-Techniken für 3D-Punktwolken vorgestellt (Abschnitt 2). In Abschnitt 3 wird die Aufbereitung der Daten und die verwendete räumliche Datenstruktur präsentiert. Abschnitt 4 erläutert die Rendering-Technik um die Daten zu visualisieren. Abschließend werden die Ergebnisse (Abschnitt 5) sowie Diskussion und Ausblick (Abschnitt 6) präsentiert.

2 Rendering-Techniken für 3D-Punktwolken

Die echtzeitfähige Visualisierung massiver 3D-Punktwolken beruht technisch auf einer *punktbasierten 3D-Rendering-Technik*, bei der im Gegensatz zum klassischen 3D-Rendering Punkte anstelle von Dreiecken als computergrafische Primitive verwendet werden (KOBELT & BOTSCH 2004). Die ersten Verfahren für punktbasiertes Rendering wurden in Surfels (PFISTER et al. 2000) und QSplat (LEVVOY & RUSINKIEWICZ 2000) vorgestellt. Basierend auf einer räumlichen Datenstruktur wird eine Hierarchie aufgebaut, die verschiedene Abstraktionsstufen für das Rendering bereitstellt. SAINZ et al. (2004) geben einen Überblick über verschiedene punktbasierte Rendering-Techniken.

SCHEIBLAUER et al. (2009) stellen ein interaktives Werkzeug vor, um das Bearbeiten von massiven 3D-Punktwolken zu ermöglichen. Das Werkzeug wird unter Anderem für die Aufbereitung, Dokumentation und Analyse von archäologischen Stätten verwendet. Die bei der Erfassung entstehenden 3D-Punktwolken sind im Allgemeinen zu groß, um eine traditionelle Verarbeitung und Überführung in dreiecksbasierte 3D-Modelle durchführen zu können. In einer räumlichen Datenstruktur werden nur die Originalpunkte der 3D-Punktwolke gespeichert, sodass eine Manipulation der Daten schnell umgesetzt werden kann (SCHEIBLAUER et al. 2009). In unserem Verfahren werden die Daten ausschließlich visualisiert, d.h. das Editieren und Entfernen von Punkten aus der Datenstruktur sowie das Erkennen von Strukturen und Objekten innerhalb der 3D-Punktwolke (KREYLOS et al. 2008) ist nicht erforderlich. Somit kann eine statische LOD-Datenstruktur verwendet werden, die die Performance des Renderingsystems verbessert. Da keine Änderungen der Daten vorgenommen werden, kann die gesamte LOD-Struktur in einem Vorverarbeitungsschritt erzeugt werden.

Aufgrund der massiven Datenmenge ist die Realisierung von Out-of-Core-Strategien ein Schwerpunkt des von uns umgesetzten Verfahrens (KREYLOS et al. 2008). Das Speichermanagement muss den limitierten Haupt- und Grafikspeicher optimal ausnutzen und sicher-

stellen, dass eine interaktive Exploration der Daten durchgeführt werden kann (RICHTER & DÖLLNER 2010a).

Weiter macht unser Verfahren keine Annahmen über geschlossene Oberflächen innerhalb der 3D-Punktwolke oder deren räumliche Verteilung. Punktbasierte Rendering-Techniken für abgetastete Objekte mit einer konstanten Verteilung der Oberflächenpunkte können die Bildqualität beim Rendering beispielsweise durch die Verwendung von orientierten Splats erhöhen (DACHSBACHER et al. 2003, BOTSCH et al. 2005). Um die Datenstruktur kompakt zu halten, werden in unserem Verfahren keine Annahmen und Berechnungen bezüglich der Abtastdichte von Punkten oder zur Existenz von Oberflächennormalen für jeden Punkt gemacht.

WIMMER & SCHEIBLAUER (2006) stellen ein Renderingsystem vor, das für die Visualisierung von 3D-Punktwolken ohne zeitaufwändige Vorberechnung entwickelt wurde. Die schnelle Verarbeitung und Visualisierung ist ein Schwerpunkt, sodass die Bildqualität beim Rendering nicht durch zusätzliche Informationen pro Punkt verbessert werden kann. Die Punkte werden ausschließlich mit Farbinformationen dargestellt, vergleichbar mit unserem Ansatz, bei dem die Farbinformationen aus zugeordneten georeferenzierten Texturen in einem Vorverarbeitungsschritt ermittelt werden. Die Berechnung von Oberflächennormalen wäre aufgrund der unregelmäßigen Punktdichte aufwändig und würde die Vorverarbeitungszeit sowie die Speicheranforderung der Daten für das Rendering erhöhen (KOBELT & BOTSCH 2004).

GOSWAMI et al. (2010) verwenden in ihrem Renderingsystem eine räumliche Datenstruktur, die für den Datentransfer zwischen CPU und GPU optimiert wurde. Die verwendete Baumstruktur ist immer ausbalanciert, was insbesondere für die Verarbeitung von 3D-Punktwolken von Einzelobjekten von Vorteil ist, da die räumliche Verteilung der Punkte im Allgemeinen stark variiert. 3D-Punktwolken aus Befliegungen sind in der Regel gleichmäßig über das Erfassungsgebiet verteilt, sodass eine räumliche Datenstruktur mit einer gleichmäßigen räumlichen Unterteilung verwendet werden kann (z. B. Octree), die in einer kürzeren Vorverarbeitungszeit generiert werden kann.

3 Aufbereitung von 3D-Punktwolkendaten und Texturdaten

In diesem Abschnitt wird die Aufbereitung der 3D-Punktwolkendaten und Texturdaten erläutert. Neben der Datencharakteristik wird die Umsetzung des Speichermanagements erläutert, um die effiziente Verarbeitung und Aufbereitung für die Echtzeit-Visualisierung durchzuführen.

3.1 Charakteristik der Daten

3D-Punktwolken bestehen im Allgemeinen aus einer Menge von ungeordneten georeferenzierten 3D-Punkten. Diese können in verschiedenen Formaten (z. B. *las*, *xyz*) vorliegen und sind in der Regel in mehrere Bereiche, basierend z. B. auf den Befliegungstreifen oder der Kachelung des Erfassungsgebietes, unterteilt. Die Anordnung und Dichte der Punkte in einer 3D-Punktwolke kann stark variieren und hängt von der Scan-Technologie, zahlreichen Faktoren während der Erfassung sowie der Charakteristik und Beschaffenheit des Erfassungsgebietes ab.

Zum Beispiel umfasst eine 3D-Punktwolke für ein Stadtgebiet mehrere Milliarden Punkte und benötigt nicht selten mehrere hundert Gi-

gabyte an Speicherkapazität. Texturdaten, z. B. Luftbilder für ein Stadtgebiet, sind in der Regel in Kacheln angeordnet, deren gesamte Größe in Abhängigkeit der Bildauflösung mehrere hundert Gigabyte betragen kann. Folglich ist eine direkte Verarbeitung dieser Daten im Haupt- und Grafikspeicher nicht möglich. Für die Verarbeitung und Visualisierung dieser Daten sind daher *Out-of-Core-Algorithmen* (bzw. External-Memory Algorithmen) notwendig. Deren spezielle Speichermanagement-Techniken sorgen für eine optimale Ausnutzung der verfügbaren endlichen Hardware-Ressourcen und ermöglichen durch die Entkopplung der Datenaktualisierung im Speicher von dem Rendering des momentan verfügbaren Datenbestands eine echtzeitfähige Visualisierung.

3.2 Grafische Attributierung der 3D-Punktwolke

Im ersten Schritt der Aufbereitung wird die 3D-Punktwolke mit RGB-Farbinformationen versehen, indem für jeden Punkt die RGB-Farbe aus den zugehörigen Texturdaten ermittelt wird. Die Herausforderung besteht darin, dieses Verfahren für mehrere Milliarden Punkte umzusetzen, um beispielsweise ein ganzes Stadtgebiet aufbereiten zu können.

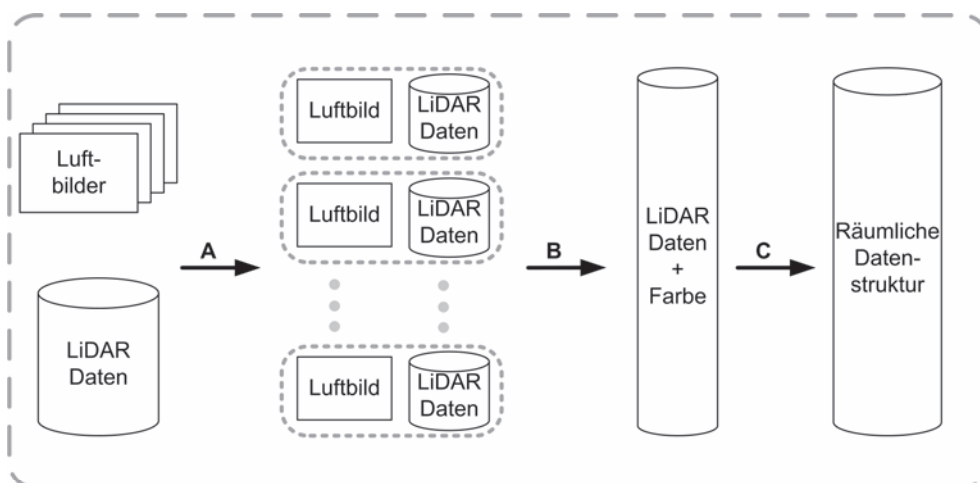


Abb. 1: Arbeitsweise am Beispiel von LiDAR-Daten und Luftbildern: Die Daten werden aufgeteilt (A), mit Farbattributen versehen (B) und in eine räumliche Datenstruktur überführt (C).

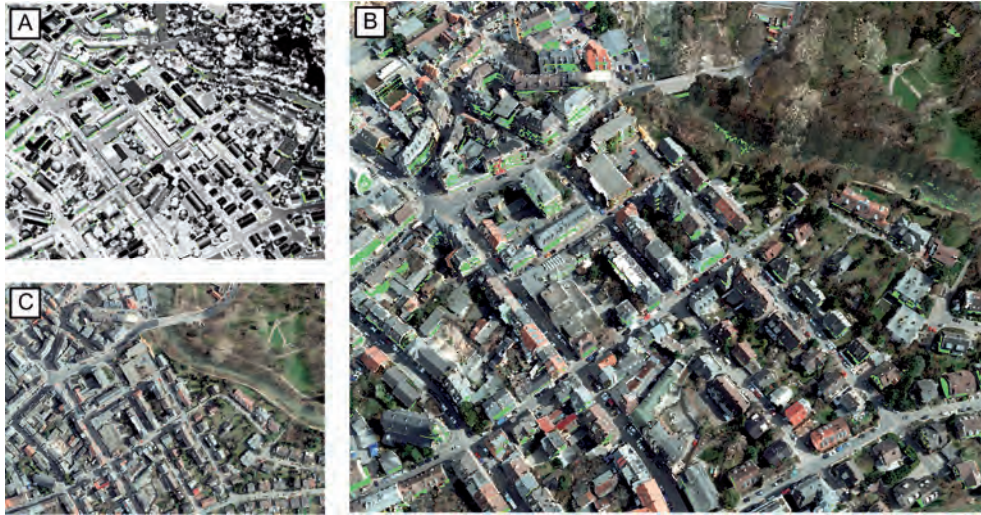


Abb. 2: 3D-Punktwolke ohne Farbinformationen (A) wird basierend auf einem Luftbild (B) mit Farbattributen angereichert (C).

Eine schnelle und effiziente Verarbeitung ist nur dann möglich, wenn der Datentransfer zwischen dem Hauptspeicher und dem sekundären Speicher (z. B. Festplatte) so gering wie möglich gehalten wird.

Die 3D-Punktwolke wird, basierend auf den Kacheln der Luftbilder, vorsortiert (Abb. 1A). Die Kacheln für die im Beispiel verwendeten LiDAR-Daten werden dabei aus der Lage und Ausdehnung der Luftbilder abgeleitet. Danach werden alle Kachelpaare, bestehend aus Luftbild und LiDAR-Daten, sequentiell im Hauptspeicher verarbeitet (Abb. 1B). Für jede Kachel werden das Luftbild und der zugehörige Teil der 3D-Punktwolke in den Hauptspeicher geladen. Jeder Punkt wird in das Luftbild hinein projiziert, um die Farbinformation zu ermitteln. Abb. 2 veranschaulicht die Ergebnisse für eine Kachel indem eine 3D-Punktwolke ohne Farbinformationen (dargestellt mit einem Farbverlauf basierend auf der Punkthöhe) und das zugehörige Luftbild sowie die resultierende farbige 3D-Punktwolke gegenübergestellt werden.

Die Attributierung der 3D-Punktwolkendaten wird in einem Vorverarbeitungsschritt durchgeführt, da bei einer Attributierung während des Renderings zusätzliche Speicher-Ressourcen für die Texturen notwendig wä-

ren. Der benötigte Speicher für die Texturinformationen pro Punkt ist generell geringer, als der benötigte Speicher für das Vorhalten von Texturen für die sichtbaren Bereiche der 3D-Punktwolkendaten während des Renderings. Darüber hinaus wäre ein zusätzliches LOD-Verfahren für Texturen erforderlich (z. B. Clipmapping).

3.3 Erzeugen der räumlichen LOD-Datenstruktur

Für eine interaktive Visualisierung der 3D-Punktwolkendaten wird die Auswahl von Punkten in Abhängigkeit des Sichtabstandes und Sichtbereiches getroffen. Um eine schnelle Auswahl der darzustellenden Punkte zu ermöglichen, werden im zweiten Schritt der Aufbereitung die gesamten 3D-Punktwolkendaten in eine räumliche LOD-Datenstruktur überführt (Abb. 1C). Die verwendete Baumstruktur ermöglicht den schnellen Zugriff auf benötigte Bereiche der 3D-Punktwolke und beinhaltet zusätzlich verschiedene Abstraktionen für die 3D-Punktwolke, um den Detailgrad in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Hardware-Ressourcen sowie Nutzerinteraktionen anpassen zu können.

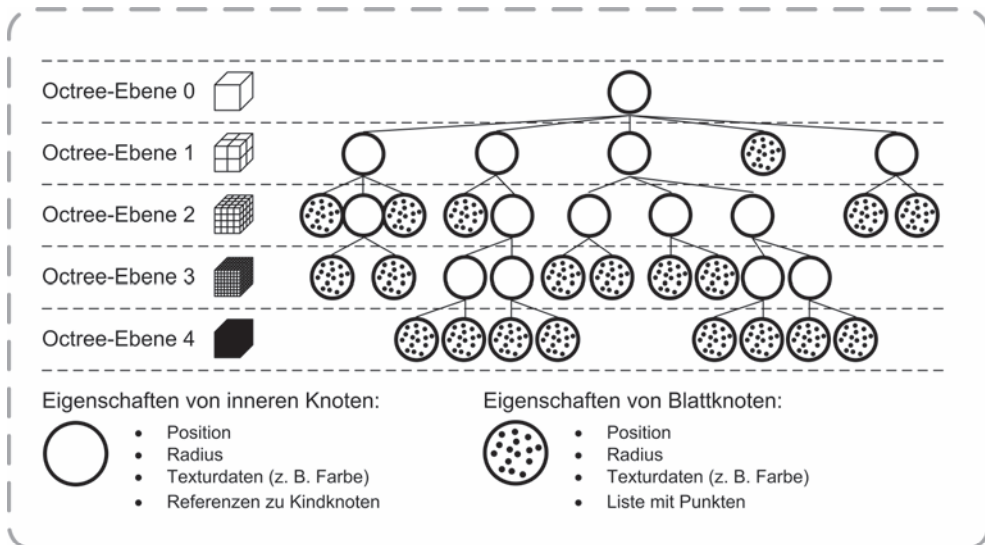


Abb. 3: Aufbau der LOD-Datenstruktur basierend auf einem Octree der Knoten mit 3D-Punktwolkendaten speichert.

Als räumliche LOD-Datenstruktur wird ein Octree verwendet, da dieser im Gegensatz zu anderen Datenstrukturen (z. B. kdTree) eine schnelle und einfache Unterteilung der unsortierten 3D-Punktwolke ermöglicht. Alle Punkte der 3D-Punktwolke werden ausschließlich in den Blattknoten gespeichert. Jeder Blattknoten speichert eine definierte Anzahl an Punkten um die Tiefe der Baumstruktur zu beschränken. Jeder innere Knoten speichert die mittlere Position aller Kindknoten sowie einen Radius, sodass eine Umkugel entsteht, die alle Punkte der Kindknoten umschließt. Abb. 3 veranschaulicht den Aufbau der LOD-Datenstruktur.

Um den Aufbau der Baumstruktur unabhängig von den Hauptspeicherressourcen durchzuführen, wird die 3D-Punktwolke mehrfach in acht Zellen unterteilt, bis die Anzahl der Punkte in einer Zelle im Hauptspeicher verarbeitet werden kann. Für jede dieser Zellen wird die Baumstruktur im Hauptspeicher erzeugt und im Sekundärspeicher abgelegt. Die separat im Hauptspeicher erzeugten Baumstrukturen jeder einzelnen Zelle werden zusammengeführt, sodass eine gesamte Baumstruktur entsteht, die alle Punkte mit Farbinformationen für eine beliebig große 3D-Punktwolke beinhaltet.

4 Echtzeit-Visualisierung von 3D-Punktwolken

In diesem Abschnitt wird das Verfahren vorgestellt, das die interaktive Visualisierung der vorprozessierten 3D-Punktwolkendaten realisiert.

Da die Datenmenge in der Regel die Kapazität des Hauptspeichers um Größenordnungen übersteigt, kann stets nur ein kleiner Ausschnitt im Hauptspeicher resident sein. Die räumliche LOD-Datenstruktur ermöglicht den Zugriff auf ein beliebiges Detaillevel der 3D-Punktwolke. Jeder Knoten im Baum repräsentiert einen bestimmten Bereich der 3D-Punktwolke, für den festgestellt werden kann, ob er im Sichtbereich des Nutzers (View-Frustum) liegt. Knoten außerhalb des Sichtbereiches werden nicht weiter betrachtet. Sichtbare Knoten werden in den Bildraum projiziert, sodass für einen Knoten entschieden werden kann, ob der repräsentierte Bereich für die Darstellung ausreichend ist. Ist der Bereich zu groß, wird die Baumstruktur solange in einem Tiefendurchlauf traversiert, bis die ermittelten Knoten nur noch einen kleinen Bereich auf dem Bildschirm abdecken (LEVOY & RUSINKIEWICZ 2000). Dieser durch wenige Pixel dargestellte Bereich kann mit wenigen Punkten vi-

sualisiert werden, obwohl im Datenbestand selbst ggf. mehrere Millionen Punkte vorhanden sind. Abb. 4 veranschaulicht das punktbaasierte Rendering für unterschiedliche Schwellwerte.

Der Schwellwert beeinflusst die Anzahl der darzustellenden Punkte sowie die benötigte Zeit für die Darstellung eines Bildes. Wenn der Speicher der Grafikkarte für die Darstellung der Punktmenge nicht ausreicht, vergrößert das Renderingsystem den Schwellwert, sodass weniger Punkte zur Grafikkarte übertragen werden müssen. Der Schwellwert wird auch verändert, wenn der Nutzer in der 3D-Punktwolke navigiert, um eine interaktive Nutzung zu ermöglichen. Zu Beginn des Verfahrens wird der Schwellwert auf 60 Pixel gesetzt. Dieser Wert wird nach den ersten Renderingdurchläufen angepasst, sodass der verfügbare Speicher und die maximale Rechenzeit optimal ausgenutzt werden, um die Interaktivität der Visualisierung zu gewährleisten.

Lücken in der Visualisierung, die bei der Darstellung von weniger Punkten auftreten

(Abb. 4A und 4B), können durch die Verwendung von größeren Renderingprimitiven (z. B. Splats) vermieden werden. Details zur Implementierung der Rendering-Technik für die Echtzeit-Visualisierung von massiven 3D-Punktwolken werden in der Arbeit von RICHTER & DÖLLNER (2010a) vorgestellt. Insbesondere das Verwenden einer *Renderingfront* als Cache für die dargestellten Bereiche der 3D-Punktwolke steigert die Performance des Renderings. Die *Renderingfront* ist eine Liste, die alle Elemente der räumlichen LOD-Datenstruktur enthält, die für das Rendering eines Bildes verwendet wurden. Basierend auf dem Rendering-Ergebnis eines Bildes kann für das nächste Bild ermittelt werden, welche Bereich der 3D-Punktwolke beibehalten oder in ihrem Detailgrad vergrößert bzw. verringert werden müssen. Darüber hinaus ermöglicht die *Renderingfront* eine Aufwandsabschätzung im Bezug auf die Renderingdauer sowie den benötigten Speicher während des Renderings.



Abb. 4: Darstellung der 3D-Punktwolke mit unterschiedlichen LOD-Stufen in Abhängigkeit der projizierten Knotengröße für die Begrenzung des Tiefendurchlaufes (800 (A), 400 (B), 100 (C) und 1 Pixel (D)).

5 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Verarbeitung und Visualisierung anhand der Daten einer Befliegung der Stadt Frankfurt am Main vorgestellt. Die erfassten 3D-Punktwolkendaten beinhalten ca. 7,5 Milliarden Punkten und benötigen in einem Binärformat 180 GB Speicher. Die Luftbilder für das Erfassungsgebiet liegen in 2.280 Kacheln vor und benötigen 161 GB Speicher.

Das Einfärben der 3D-Punktwolke benötigt 4,5 Stunden Rechenzeit und ergibt eine 106 GB große Datei (Abb. 1B). Das Überführen in die räumliche LOD-Datenstruktur benötigt 20 Stunden Rechenzeit und erfordert 116 GB Speicher für den Beispieldatensatz (Abb. 1C). Abb. 5 zeigt die komplette 3D-Punktwolke des Frankfurter Stadtgebietes, dargestellt mit ca. 10 Millionen Punkten.

Bei der in Abb. 5 verwendeten Ansicht werden die Daten aus einer größeren Entfernung betrachtet, um einen Überblick über den gesamten Datenbestand zu erhalten. Aufgrund der Entfernung muss der Rendering-Algorithmus die LOD-Datenstruktur nicht bis zu den Blattknoten traversieren, da bereits geringe LOD-Level eine ausreichende Punktdichte für die Visualisierung ermöglichen. Die tatsächlich dargestellten Punkte repräsentieren teilweise mehrere tausend Einzelpunkte, die sich in der LOD-Datenstruktur unterhalb des LOD-Levels in den Blattknoten befinden. Bei Detailansichten, wie z. B. in Abb. 4D, wird die LOD-Datenstruktur in der Regel bis zu den Blattknoten traversiert, sodass alle verfügbaren Punkte für den ausgewählten Ausschnitt der 3D-Punktwolke für die Darstellung vom Rendering-Algorithmus ausgewählt werden.

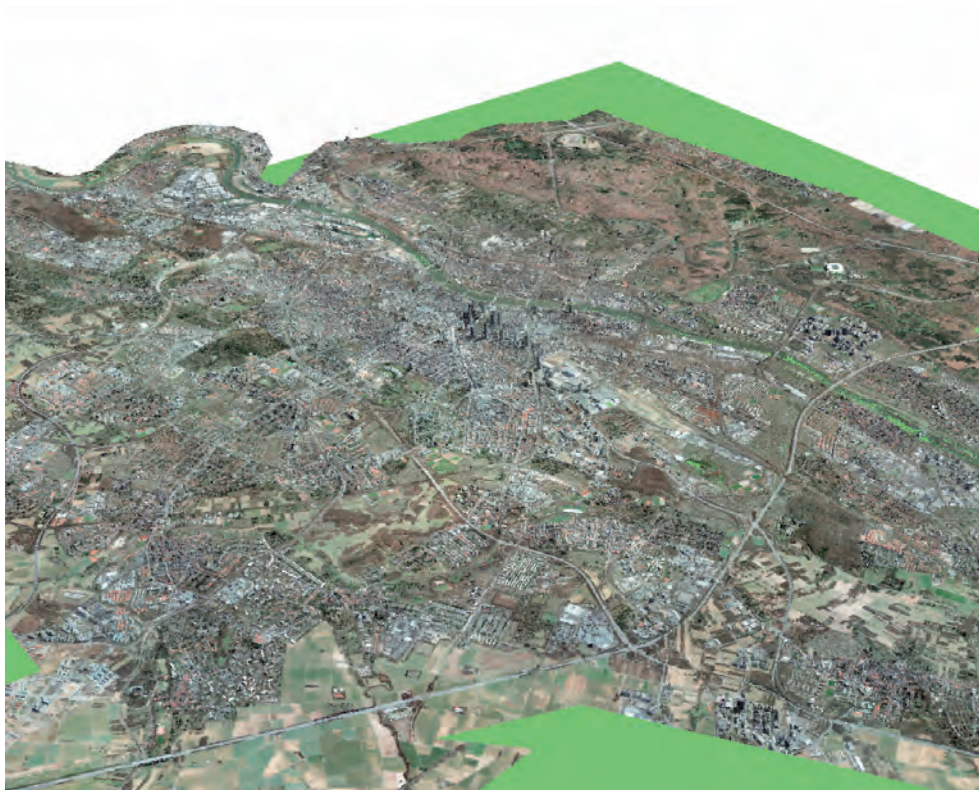


Abb. 5: 3D-Punktwolke des gesamten Frankfurter Stadtgebietes in einer Überblicksvisualisierung als 3D-Punktwolke mit 10 Millionen Punkten.

6 Diskussion und Ausblick

Aufgrund der hinzugefügten thematischen Information aus georeferenzierten Texturen ist eine gezielte Aufbereitung und Gestaltung möglich, die z. B. eine bessere Orientierung sowie Zuordnung von Bereichen innerhalb der 3D-Punktwolke zu realen Objekten erlaubt. Eine Schwäche des Ansatzes resultiert aus der Datenerfassung und zeigt sich dann, wenn 3D-Punktwolkendaten und georeferenzierte Texturdaten nicht zum gleichen Zeitpunkt aufgenommen wurden, sodass beispielsweise Farbinformationen für bewegliche Objekte wie Fahrzeuge und Flugzeuge (Abb. 6A) sowie feingranulare Objekte wie Vegetation (Abb. 6B) nicht korrekt abgebildet werden. In Abb. 6A ist zu erkennen, dass das im Luftbild befindliche Flugzeug nicht durch die 3D-Punktwolke repräsentiert wird und die in der 3D-Punktwolke vorhandenen Flugzeuge mit falschen Farbinformationen versehen werden. Abb. 6B zeigt einen Bereich mit Vegetation. Die Bodenpunkte unterhalb der Baumkrone werden mit Farbinformationen des Baumes eingefärbt.

Aufgrund der Erfassung durch eine Befliegung ist die Punktdichte auf Dachflächen signifikant höher als an Gebäudefassaden. Insbesondere bei hohen Gebäuden entstehen des-

halb Löcher an senkrechten Gebäudebestandteilen in der durch die 3D-Punktwolke beschriebenen Oberfläche. Die Visualisierung und damit verbundene Wahrnehmung der Punkte als Gesamtgebäude wird somit aus einer nicht orthogonalen Detailansicht erschwert. Fassaden beispielsweise werden kaum sichtbar dargestellt, sodass Lücken in der Visualisierung entstehen (Abb. 6C). Eine Kombination aus terrestrischen oder mobilen Erfassungsmethoden mit Fahrzeugen und Befliegungen könnte die fehlenden Oberflächeninformationen an Gebäudefassaden teilweise ergänzen.

Die interaktive Visualisierung massiver 3D-Punktwolkendaten eröffnet einen direkten und schnellen Zugang zu den Original-Daten, wodurch nicht nur bessere Werkzeuge zur Analyse und Exploration von 3D-Punktwolken, sondern auch zugehörige Workflows, z. B. bei der Fortführung von 3D-Stadtmodellen, beschleunigt werden können (RICHTER & DÖLLNER 2010b). Damit erhalten Anwendungen und Systeme Funktionalitäten, auf deren Basis leicht Analysefunktionalität integriert werden kann. In Zukunft arbeiten wir an Werkzeugen, die eine Out-of-Core-Differenzanalyse für 3D-Punktwolkendaten ermöglichen, um z. B. Veränderungen an Bauwerken, Infrastrukturelementen und Geländeoberflä-

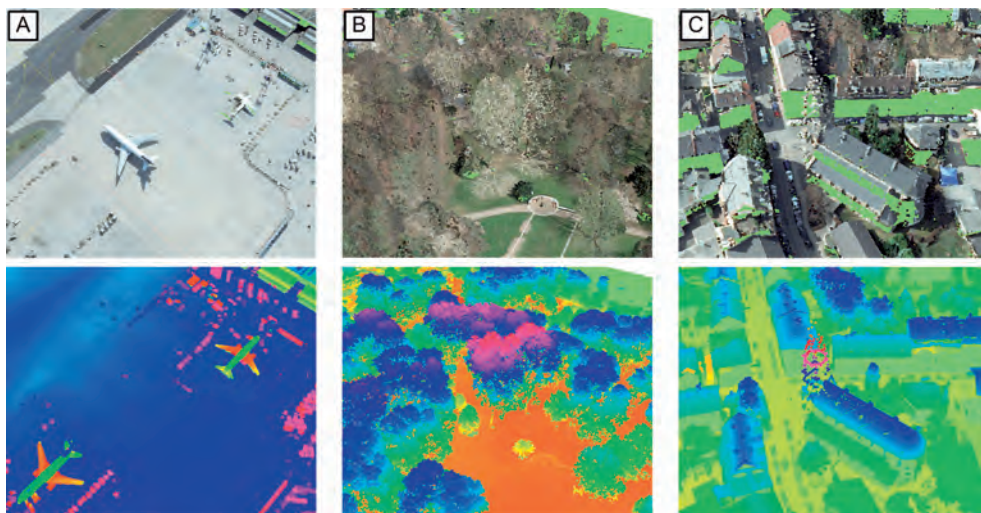


Abb. 6: Ausgewählte Ausschnitte der 3D-Punktwolke mit Farbinformationen (oben) sowie Höheninformationen (unten) um Unterschiede zwischen Geometrie- und Farbrepräsentation sichtbar zu machen.

chen von Städten und Landschaften visualisieren, bestimmen und quantifizieren zu können.

Danksagung

Dieses Forschungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und ist Teil der InnoProfile Nachwuchsforschergruppe 3D-Geoinformationen (www.3dgi.de). Die verwendeten Datensätze wurden vom Stadtvermessungsamt der Stadt Frankfurt am Main sowie von Fa. virtualcitySYSTEMS, Berlin zur Verfügung gestellt.

Referenzen

- BOTSCH, M., HORNING, A., ZWICKER, M. & KOBELT, L., 2005: High-Quality Surface Splatting on Today's GPUs. – Symposium on Point-Based Graphics: 17–24.
- BRENNER, C., 2005: Building Reconstruction from Images and Laser Scanning. – International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 6 (3–4): 187–198.
- DACHSBACHER, C., VOGELGSANG, C. & STAMMINGER, M., 2003: Sequential point trees. – ACM Transactions on Graphics 22: 657–662.
- DÖLLNER, J., BAUMANN, K. & HINRICHS, K., 2000: Texturing Techniques for Terrain Visualization. – VIS '00: Conference on Visualization '00: 227–234.
- FRÜH, C., SAMMON, R. & ZAKHOR, A., 2004: Automated Texture Mapping of 3D City Models With Oblique Aerial Imagery. – 3DPVT: 396–403.
- GOSWAMI, P., ZHANG, Y., PAJAROLA, R. & GOBBETTI, E., 2010: High Quality Interactive Rendering of Massive Point Models using Multi-way kd-Trees. – Pacific Graphics Poster Papers.
- GRÖGER, G. & PLÜMER, L., 2009: Updating 3D city models: how to preserve geometric-topological consistency. – 17th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems: 532–535.
- KOBELT, L. & BOTSCH, M., 2004: A Survey of Point-Based Techniques in Computer Graphics. – Computers & Graphics 28 (6): 801–814.
- KREYLOS, O., BAWDEN, G.W. & KELLOGG, L.H., 2008: Immersive Visualization and Analysis of LiDAR Data. – International Symposium on Advances in Visual Computing: 846–855.
- LAFARGE, F., DESCOMBES, X., ZERUBIA, J. & PIERROT-DESEILLIGNY, M., 2010: Structural Approach for Building Reconstruction from a Single DSM. – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 32 (1): 135–147.
- LEVOY, M. & RUSINKIEWICZ, S., 2000: QSPat: A Multiresolution Point Rendering System for Large Meshes. – ACM SIGGRAPH: 343–352.
- MACEachREN, A.M., EDSALL, R., HAUG, D., BAXTER, R., OTTO, G., MASTERS, R., FUHRMANN, S. & QIAN, L., 1999: Virtual Environments for Geographic Visualization: Potential and Challenges. – 1999 Workshop on new Paradigms in Information Visualization and Manipulation: 35–40.
- PFISTER, H., ZWICKER, M., BAAR, J.V. & GROSS, M., 2000: Surfels: Surface elements as rendering primitives. – ACM SIGGRAPH: 335–342.
- RICHTER, R. & DÖLLNER, J., 2010a: Out-of-Core Real-Time Visualization of Massive 3D Point Clouds. – 7th International Conference on Virtual Reality, Computer Graphics, Visualization and Interaction in Africa: 121–128.
- RICHTER, R. & DÖLLNER, J., 2010b: Bestandsaktualisierung von 3D-Stadtmodellen durch Analyse von 3D-Punktwolken. – Tagungsband der 3-Ländertagung DGPF, Wien.
- SAINZ, M., PAJAROLA, R. & LARIO, R., 2004: Points reloaded: Point-based rendering revisited. – Symposium on Point-Based Graphics: 121–128.
- SCHEIBLAUER, C., ZIMMERMANN, N. & WIMMER, M., 2009: Interactive Domitilla Catacomb Exploration. – Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage: 65–72.
- TANNER, C.C., MIGDAL, C.J. & JONES, M.T., 1998: The clipmap: a virtual mipmap. – SIGGRAPH 98: 151–158.
- WIMMER, M. & SCHEIBLAUER, C., 2006: Instant Points: Fast Rendering of Unprocessed Point Clouds. – Eurographics Symposium on Point-Based Graphics: 129–136.
- ZHOU, Q. & NEUMANN, U., 2008: Fast and extensible building modeling from airborne LiDAR data. – Proceedings of the 16th ACM SIGSPATIAL international conference on Advances in geographic information systems: 1–8.

Adresse der Autoren:

RICO RICHTER und Prof. Dr. JÜRGEN DÖLLNER, Hasso-Plattner-Institut, Universität Potsdam, Fachgebiet Computergrafische Systeme, D-14482 Potsdam, Tel.: +49-331-5509-170, Fax: +49-331-5509-172, e-mail: rico.richter@hpi.uni-potsdam.de, juergen.doellner@hpi.uni-potsdam.de

Manuskript eingereicht: Januar 2011

Angenommen: März 2011



Historisches 4D-Stadtmodell der Freien und Hansestadt Hamburg – Automatisierte Generierung und Darstellung innerhalb der Google Earth Engine

FRIEDRICH KELLER, JÉRÔME SÄNGER, THOMAS KERSTEN & JOCHEN SCHIEWE, HAMBURG

Keywords: 4D, CAD, Modellierung, Punktwolke, Stadtmodell, Streifenprojektion, Visualisierung

Summary: *Historical 4D City Model of the Free and Hanseatic City of Hamburg – Automated Generation and Presentation within the Google Earth Engine.* Current 3D city models are already world-wide available for many cities. However, the production of historical city models is still in the beginning, i. e. so far only for a small number of cities a historical city model has already been developed. In this contribution a procedure is presented, that combines different data sources in order to derive individual 3D city models of different time epochs by the example of the Free and Hanseatic City of Hamburg. A wooden model of the city from the year 1644 and an official map from 1859 have been used as a basis for the generation of the 4D city model of Hamburg. The model at a scale of approx. 1:1000 was scanned in 3D by the fringe projection system ATOS I from GOM. From the produced point cloud buildings were generated automatically in an adjustment using the roof points, whereby over 80% of the simple buildings were recognized and generated in 3D with the assistance of the building ground plans, which were derived from the point cloud. However, more complex buildings such as churches had to be still modelled manually. In the second part of the work the building ground plans were digitized from the map of 1859, which were combined afterwards with height information from plans, photos, designs and paintings for 3D modelling. The two generated city models were geo-referenced using some church ground plans, which changed only little through the centuries. From these two epochs further epochs (1200, 1400, 1589 and 1700) were derived using different historical bird's-eye views (isometric views) of the city. For the visualization of the 4D city model in Google Earth a program was developed using the Google Earth Application Programming Interface, which allows the navigation in the 4D city model with its six epochs and the representation of meta data (e.g. emergence, description, history, etc.) for individual objects.

Zusammenfassung: Aktuelle 3D-Stadtmodelle gibt es weltweit bereits von vielen Städten. Jedoch steht die Erstellung von digitalen historischen Stadtmodellen noch in ihren Anfängen, d.h. bisher gibt es nur vereinzelt Städte, für die ein historisches Stadtmodell erstellt wurde. In diesem Beitrag wird ein Verfahren vorgestellt, bei dem unterschiedliche Datenquellen miteinander verknüpft werden, um daraus einzelne Stadtmodelle verschiedener Zeitpunkte (Epochen) am Beispiel der Freien und Hansestadt Hamburg abzuleiten. Als Grundlage für das Hamburger 4D-Stadtmodell wurden ein Holzmodell der Stadt, das das Jahr 1644 zeigt, und eine amtliche Karte von 1859 ausgewählt. Das Modell im Maßstab von ca. 1:1000 wurde durch ein Streifenprojektionssystem ATOS I von GOM 3D erfasst. Aus der mit ATOS erzeugten Punktwolke wurden die Gebäudemodelle über die Dachpunkte in einer Ausgleichung automatisch generiert, wobei mithilfe der aus der Punktwolke abgeleiteten Grundrisse über 80% der einfachen Gebäudemodelle erkannt und in 3D erstellt wurden. Allerdings mussten komplexere Gebäude wie Kirchen noch manuell modelliert werden. Im zweiten Teil der Arbeit wurden aus der Karte von 1859 die Gebäudegrundrisse digitalisiert, die im Anschluss daran zur 3D-Modellierung mit Höheninformationen aus Plänen, Fotos, Zeichnungen und Gemälden verknüpft wurden. Die beiden generierten Stadtmodelle wurden dann über einige Kirchengrundrisse, die sich im Laufe der Jahrhunderte wenig verändert haben, georeferenziert. Aus diesen beiden Epochen wurden aus verschiedenen historischen Vogelperspektiven (Isometrische Ansichten) die Objekte weiterer Zeitpunkte (1200, 1400, 1589 und 1700) abgeleitet. Zur Visualisierung des 4D-Stadtmodells in Google Earth wurde mithilfe des Google Earth Application Programming Interfaces ein Programm entwickelt, das die Navigation durch das 4D-Stadtmodell mit seinen sechs Epochen und die Darstellung von Metadaten (z. B. Entstehung, Beschreibung, Geschichte, usw.) zu den einzelnen Objekten ermöglicht.

1 Einleitung

Aktuelle 3D-Stadtmodelle sind derzeit wissenschaftlich und gesellschaftlich ein viel diskutiertes Thema. So haben sich unterschiedliche Nutzerkreise wie Stadtplaner, Architekten, Denkmalpfleger, Umweltfachleute, Mobilfunkfachleute, Sicherheitskräfte, große Internet-Anbieter und Hersteller von Navigationsgeräten des Themas in den letzten Jahren angenommen. So hat sich die dreidimensionale Darstellung von Geodaten insbesondere von Stadtmodellen als ein Trend im Internet entwickelt.

Dabei stellen digitale historische Stadtmodelle, die dem Betrachter einen Einblick in die Vergangenheit der Stadt vermitteln sollen, ein weitgehend neues Betätigungsfeld dar. Anders als bei aktuellen Modellen können historische Stadtmodelle nicht mit modernen Messverfahren wie Airborne Laserscanning oder Luftbildphotogrammetrie erfasst werden, sondern werden meist aus einem breit gefächerten Spektrum von Daten wie Karten, Photographien, Lithographien, Gemälden oder Holzmodellen in Museen abgeleitet. Hierzu müssen meist andere Aufnahmemethoden im Nahbereich eingesetzt werden.

Um ein historisches Stadtmodell von Hamburg zu erstellen, wurden verschiedene Aufnahmemethoden, der jeweiligen Quelle entsprechend, ausgewählt und eingesetzt. Als Ausgangsbasis für das zu erstellende 4D-Modell dienten zwei Zeitpunkte. So ist im Hamburgmuseum ein Holzmodell mit ca. 5000 Gebäuden der heutigen Innenstadt ausgestellt, das Hamburg im Jahr 1644 zeigt und 1936 im

Maßstab ca. 1:1000 gefertigt wurde (Abb. 1 links). Als zweite Datenquelle wurde eine Karte von 1859 im Maßstab von 1:4000 verwendet (Abb. 1 rechts), die eine der ersten amtlichen Vermessungen und Kartierungen der Stadt darstellt.

Ähnliche Arbeiten wurden bereits für die Städte Duisburg, Solothurn (Schweiz), Prag (Tschechien) und Toul (Frankreich) durchgeführt. Von der mittelalterlichen Stadt Duisburg wurden aus drei Holzmodellen im Maßstab 1:500 virtuelle Modelle der Jahre 1000, 1200 und 1566 (ca. 800 Gebäude) erstellt (JEDZEJAS & PRZYBILLA 2009). Dafür bildeten Punktwolken des terrestrischen Laserscanners IMAGER 5006 die Grundlage, um aus automatisiert abgeleiteten Dachformen, Gebäudehöhen und -grundrissen sowie Orthophotos die Gebäudeobjekte zu konstruieren. Die virtuellen Modelle wurden anschließend für eine Präsentation in Google Earth aufbereitet. Das historische Modell der Stadt Solothurn von 1830 (Maßstab ca. 1:500, ca. 900 Gebäude) wurde mit verschiedenen 3D-Messverfahren (Präzisions-Handscanner Leica T-Scan, digitale Spiegelreflexkamera Nikon D200 und einer HD-Videokamera) im Vergleich aufgenommen (NEBIKER et al. 2009), um die städtische 3D-Szenarien zu rekonstruieren, zu texturieren und in einem 3D-GIS zu integrieren. Für die Aufnahme des historischen Prager Stadtmodell aus Papier (Maßstab 1:480), erstellt in den Jahren 1826–1839, wurde ein Roboter entwickelt, der das gesamte Stadtmodell mit einer Fläche von $3,5\text{ m} \times 6\text{ m}$ innerhalb von zwei Monaten mit einer digitalen Kamera (4K-Auflösung) durch ca. 300.000



Abb. 1: Grundlagedaten für die Generierung des Hamburger 4D-Stadtmodells: Holzmodell des Jahres 1644 im Hamburgmuseum (links) und Karte der Hamburger Innenstadt von 1859 (rechts).

Fotos berührungslos aufnehmen (SEDLACEK & ZARA 2009). Das komplexe Modell enthält auf 60 Teilstücken 2000 Gebäude und 7000 weitere Objekte wie Schuppen, Mauern, Statuen und Bäume. Aus den Bildern wurden Punktwolken generiert, die nach Segmentierung der Boden- und Gebäudepunkte durch Voronoi Triangulation vermascht und als texturierte Polygone dargestellt wurden. Dagegen stellt die Erfassung des kleineren Holz- und Papiermodells der Stadt Toul (nahe Nancy in Frankreich) von 1840–1860 einen geringeren Aufwand dar, da auf einer Fläche von $2,3\text{ m} \times 2,2\text{ m}$ nur ca. 900 Gebäude durch Fotos und Laserscanning aufgenommen werden mussten. Dazu wurden in PhotoModeler Dachpunkte gemessen, aus denen anschließend automatisch 3D-Gebäude erstellt wurden, während das Gelände aus Laserscanningdaten modelliert wurde (CHEVRIER et al. 2010).

Im Vergleich zu den anderen oben beschriebenen Modellen stellt das historische Holzmodell von Hamburg mit dem kleineren Maßstab von ca. 1:1000 eine besondere Herausforderung bei der Datenerfassung und -modellierung dar. Im Gegensatz zu den drei Epochen des Duisburger Stadtmodells wurden für das historische Hamburg in 4D die verschiedenen Zeitepochen aus weiteren Datenquellen wie Karte und Ansichten abgeleitet.

2 Datenerfassung

Bei den zwei ausgewählten Datenquellen (Holzmodell und Karte) wurden unterschiedliche Erfassungsmethoden eingesetzt.

2.1 Aufnahme des Holzmodells

Für das Holzmodell standen zunächst drei Aufnahmesysteme an der HCU Hamburg zur Auswahl: terrestrischer Laserscanner Z+F IMAGER 5006i, Streifenprojektionssystem (ATOS I 2M) der Firma GOM und digitale Spiegelreflexkameras. Die Vor- und Nachteile bildbasierter Aufnahmesysteme sind in (REMONDINO & EL-HAKIM 2007) und (LUHMANN 2010) beschrieben worden, während rangebasierte Messsysteme in (LUHMANN 2010) vorgestellt werden. Für die Aufnahme des Holzmodells im Museum ist vorab das terrestrische Laserscanning mit dem IMAGER 5006i getestet worden, da diese Aufnahmemethode bei einem vergleichbaren Projekt für die Stadt Duisburg gute Ergebnisse geliefert hatte (JEDZEJAS & PRZYBILLA 2009). Allerdings stellte sich in Untersuchungen heraus, dass das Rauschen in der Punktwolke der aufgenommenen Testdaten für eine Modellierung des Hamburger Modells im Maßstab 1:1000 zu groß ist.

Daher wurde aufgrund der technischen Spezifikationen und erfolgreicher Testaufnahmen das Messsystem ATOS I 2M für die Aufnahme des Holzmodells eingesetzt (Abb. 2). Das System besteht aus zwei Kameras (2×2 Megapixel-Kamera) und einem Projektor, mit dem ein Messbereich von 55×44 bis $500 \times 400\text{ mm}^2$ mit 2 Millionen Punkten und einem Punktabstand von $0,04\text{--}0,31\text{ mm}$ aufgenommen werden kann. Die Genauigkeit des Messsystems beträgt ungefähr $40\text{ }\mu\text{m}$, was für die Aufgabenstellung mehr als ausreicht. Das stabile Säulenstativ und der lange Ausleger erlauben eine flexible und optimale Auf-



Abb. 2: Aufnahme des Holzmodells im Hamburgmuseum mit dem Streifenprojektionssystem ATOS I: Messsystem über dem Modell (links) und Aufnahmefenster mit Streifenmuster im Messbereich (rechts).

nahme des auf zwei Platten (Ost- und Westteil) montierten Holzmodells (Gesamtfläche $2,8 \times 2,8 \text{ m}^2$) mit einer teilweise engen Bebauung in der Hamburger Innenstadt.

Nach der Systemkalibrierung wurden an einem Arbeitstag insgesamt 431 Aufnahmen gemacht, was insgesamt zu einem Datenvolumen von 821 Mio. Punkten geführt hat. Eine lückenlose Aufnahme wurde durch Überdeckung der einzelnen Scans gewährleistet, wobei die Scans über im Modell angebrachte Zielzeichen verknüpft wurden (Abb. 4 rechts). Die jeweiligen Aufnahmen wurden gleich nach der Messung über Passpunkte in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert und anschließend feinausgerichtet und vermascht. Die automatisch vom Aufnahmeprogramm erstellte Dreiecksvermaschung führte zu einer Reduktion auf 41,7 Mio. Dreiecksknotenpunkte (4,1 GByte), die für die weitere Verarbeitung genutzt wurden, in dem die Knotenpunkte der Dreiecke als „Punktwolke“ exportiert wurden.

2.2 Digitalisierung der amtlichen Karte

Die Gebäudegrundrisse wurden manuell in der mit 300 dpi gescannten amtlichen Karte von 1859 (Maßstab 1:4000, Format $94,3 \times 60,6 \text{ cm}^2$, 11.138×7.164 Pixel) digitalisiert. Da die Karte nur genaue Lageinformationen enthält, mussten die Gebäudehöhen aus verfügbaren Fassadenplänen, Photographien oder Gemälden abgeleitet werden, indem über einfache Verhältnisbildung von der Länge der Gebäudegrundseite auf die Gebäudehöhe geschlossen wurde. In Bereichen ohne eindeutige Informationen wurden die Höhen der Gebäude geschätzt und an die umliegenden Gebäude entsprechend angepasst. Für eine weitere Verfeinerung des virtuellen Modells mussten zusätzliche Informationen über Gebäudehöhen aus dem Staatsarchiv oder dem Denkmalschutzamt in Hamburg herausgesucht werden. Die Zuordnung dieser Informationen zu den entsprechenden Gebäuden stellt allerdings einen erheblichen manuellen Aufwand dar. Die 3D-Modellierung der digitalisierten Gebäudegrundrisse ist in Abschnitt 4.2 beschrieben.

3 Automatisierte Gebäudeextraktion

Um die mit dem Streifenprojektionssystem erzeugte Punktwolke weiterverarbeiten und daraus Gebäudemodelle extrahieren zu können, wurde ein C#-Programm entwickelt, mit dessen Hilfe die Punktwolke automatisiert prozessiert werden konnte.

3.1 Datenfilterung

Da die Software zunächst für Laserscannerdaten entwickelt wurde, kann der eigentlichen Gebäudeextraktion eine Filterung der Daten vorgeschaltet werden. Dafür wird in der XY-Ebene der Punktwolke ein einfaches Raster mit einstellbarer Größe (z. B. 1 mm) erzeugt, für das dann in jeder Rasterzelle eine maximale Höhe berechnet wird, nachdem Ausreißer eliminiert sind. Dieses iterative Verfahren wird auf das gesamte Raster angewendet, so dass in der gefilterten Punktwolke alle Gebäudewandpunkte eliminiert werden und nur noch Boden- und Dachpunkte enthalten sind. Dieses Verfahren wird auch ausführlich in (JEDRZEJAS 2008) beschrieben. Bei den Daten der Streifenprojektion war jedoch eine derartige Filterung nicht erforderlich, da die Punktwolke wegen der vorher erfolgten Dreiecksvermaschung bereits bereinigt war. Trotzdem wurde diese Filterfunktion in der selbst entwickelten Software belassen, um bei anderen Modellen auch Laserscannerdaten verarbeiten zu können.

3.2 Generierung der Gebäudegrundrisse

Um eine vollständige automatische Gebäudemodellierung aus einer Punktwolke heraus zu realisieren, ist es nötig, auch den Grundriss erfassen zu können. Diese Funktion sollte in die Software implementiert werden. Dazu wurden zunächst vorher aufgenommene Testdaten des Laserscanners prozessiert. Es wurde ein Schnitt ungefähr in Traufhöhe der Gebäude durch die Punktwolke gelegt. Dieser Schnitt wurde dann in die XY-Ebene orthogonal projiziert und in ein Bild überführt. In dem binä-



Abb. 3: Testdatensatz vom IMAGER 5006i: Punktwolke (links), Orthogonal-Projektion der Punktwolke als Bild (Mitte), Gebäudepunkte als Ergebnis der ersten Filterung (rechts).



Abb. 4: Digitalisierte Grundrisse (schwarz) mit der überlagerten Punktwolke (blau) (links), Darstellung der dichten und komplexen Bebauung in der Nadiraufnahme eines Ausschnittes des Hamburger Holzmodells von 1644 mit signalisierten Punkten für die Verknüpfung der einzelnen Scans (rechts).

ren Bild sind alle gescannten Punkte schwarz dargestellt, der Rest weiß (Abb. 3).

Anschließend sollten zwei verschiedene Bildverarbeitungsalgorithmen zur Geradenerkennung eingesetzt werden, da die Wandpunkte der Gebäude unterhalb des Schnitts als gepunktete Gerade dargestellt werden. Als Ergebnis der Filterung des Bildes mit einer Filtermatrix erhält man ein bereinigtes Binärbild der Gebäudegrundrisse als gepunktete Kanten (Abb. 3 rechts), wodurch z. B. ein Canny-Operator (CANNY 1986) zur Kantenextraktion nicht mehr erforderlich war. Zur eigentlichen Geradenerkennung wurde dann eine Hough-Transformation (HOUGH 1962) getestet. Allerdings traten bei der Rücktransformation aus dem Hough-Raum ins Bild große Probleme auf, da die einzelnen Pixel nicht richtig als Kante identifizierbar waren. Im Hough-Raum bildeten sich Cluster gleicher Werte und nicht wie üblich Cluster mit einem klaren Maximum, die bei der Rücktransformation zu einer Art Geradenschar führen. Aus diesem Grund konnte dieser Programmteil nicht in einen

operationellen Zustand gebracht werden. In den Punktwolken des später anstatt des Laserscanners eingesetzten Streifenprojektionssystems sind aufgrund ihrer Struktur (Dreiecksknotenpunkte) sehr wenig Wandpunkte vorhanden. Dies führt im Algorithmus dazu, dass gar keine Geraden mehr erkannt werden können, da diese nur noch aus wenigen Einzelpunkten bestehen. Automatische Verfahren der Bildverarbeitung zur Erstellung der Grundrisse führten trotz intensiver Tests und Untersuchungen mit diesem Datensatz nicht zum Erfolg (KELLER & SÄNGER 2010). Punktbasierte Verfahren im 3D-Raum zur automatischen Generierung der Grundrisse wurden noch nicht getestet.

Um nun Grundrisse der Gebäude trotzdem zügig zu erhalten, wurde die Punktwolke manuell ausgewertet und digitalisiert (Abb. 4 links). Dabei wurden die „Grundrisse“ in der Gebäudetraufhöhe durch Horizontalschnitte in der Punktwolke ermittelt, da bei der engstehenden Bebauung sonst keine Digitalisierung möglich gewesen wäre. Im Vergleich zu aktu-

ellen Stadtmodellen ist dieser Schritt leider notwendig, da man nicht auf vorhandene Katasterdaten zurückgreifen kann, um die Grundrisse zu erhalten.

3.3 Automatische Generierung der Gebäude

Da die Grundrisse zur Datenprozessierung in Traufhöhe festgelegt wurden, konnten so zur Trennung von Dach- und Wandpunkten alle tiefer liegenden Punkte der Wände einfach eliminiert werden. Mit den Grundrissen wurden dann aus der Punktwolke die zum jeweiligen Haus gehörenden Punkte über ein Point-in-Polygon Verfahren selektiert. Zur Geschwindigkeitssteigerung wurde der Grundriss auf der kurzen Seite halbiert, so dass nur eine Dachseite analysiert werden musste. In diese ausgewählten Punkte wurde mithilfe einer iterativen Ausgleichung eine Ebene gelegt. Um ein symmetrisches Dach zu erhalten, wurde die Ebene auf die andere Dachseite gespiegelt berechnet. Abschließend sind dann Trauf- und Firsthöhe über die Ebene berechnet worden, um die anderen Fassadenelemente (Wände und Giebel) zu konstruieren. Bei dieser Art der automatischen Berechnung von Gebäudemodellen wurden aufgrund der Modellbeschaffenheit zwei wesentliche Annahmen getroffen: das Holzmodell besteht nur aus Gebäuden mit Satteldächern und jedes Gebäude hat nur vier Grundseiten. Mit diesen Annahmen wurden die Gebäude in der selbst entwickelten Software automatisch konstruiert.

Als ein weiterer Automatisierungsschritt innerhalb der Software wurde die Generierung von komplexen Dachformen und Grundrissen mit mehr als vier Seiten diskutiert. Hierzu wurde ein Verfahren, das auch schon in (JANSA & STANEK 2003) beschrieben wurde, implementiert. In diesem Verfahren wird in die selektierte Gebäudepunktwolke eine Vielzahl von kleinen Ebenen gelegt. Die Parameter der Ebenen werden in einen Parameterraum übertragen, in dem große Flächen dann einen Cluster bilden, da diese durch viele kleine, aber parametrisch gleiche Ebenen ausgedrückt werden können. Zur Analyse und Erkennung der Cluster können verschiedene Verfahren eingesetzt werden.

Ein Clusteranalyseverfahren, das geeignet für diese Aufgabenstellung erschien, ist die Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique (ISODATA) (DUDA & HART 1973). Dies ist ein anspruchsvoller und ausgereifter Algorithmus, der es erlaubt, die Anzahl der Clusterzentren automatisch während der Iteration zu ermitteln. Dies geschieht, indem ähnliche Cluster verschmolzen und Cluster mit großer Variation gesplittet werden. Nach der Erkennung kann aus den Clustern die jeweilige Ebene zurückgerechnet werden. Abschließend werden diese Ebenen verschnitten und mit den Originalpunkten begrenzt, so dass sich eine beliebige Dachform erstellen lässt. Erste Tests mit dieser selbst programmierten Software verliefen vielversprechend und werden derzeit weiter entwickelt, so dass die Software flexibler wird. Alle Gebäudemodelle wurden allerdings in der Software mit der einfachen



Abb. 5: Ergebnisse der Modellierungssoftware nach zwei Iterationen für Block 5 (Ostteil); Grün: NV < 3.3, Gelb: NV > 3.3, Rot: Dachneigung auf 0 gesetzt.

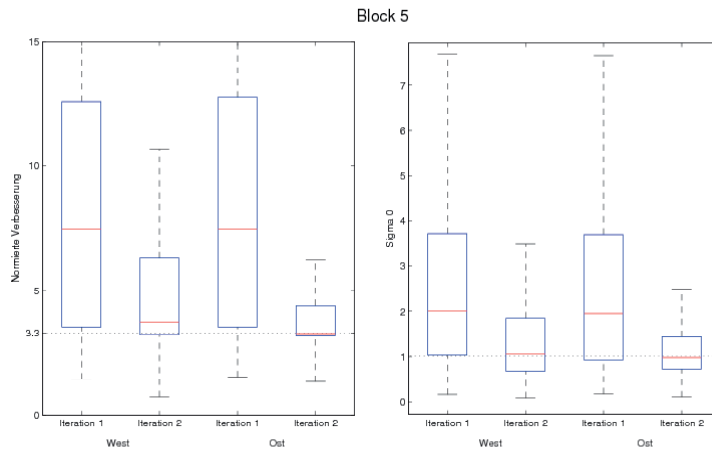


Abb. 6: Box-Whiskerplot für die Normierte Verbesserung NV (links) und für Sigma 0 (rechts) der Blöcke Ost 5 und West 5.

Variante berechnet, die sich nachher aber leicht durch komplexere bzw. detailliertere ersetzen lassen. Abb. 5 zeigt exemplarisch eine Visualisierung des Berechnungsergebnisses der Modellierungssoftware für Block 5, bei der grüne Gebäudemodelle als „korrekt“ (kleiner als der Schwellwert für die Normierte Verbesserung $NV < 3,3$), gelbe mit „Berechnung über den Schwellwert ($NV > 3,3$)“ und rote Gebäude mit „Berechnung fehlgeschlagen $\Rightarrow$ Dachneigung = NULL“ gekennzeichnet wurden. Aus der Software wurden automatisch DXF-Dateien erzeugt, die dann weiter bearbeitet werden konnten.

Zur Kontrolle wurden die während der Berechnung generierten Daten protokolliert, um im Anschluss daran eine Aussage zur Qualität machen zu können. In der Modellierungssoftware können folgende Parameter vor der Berechnung eingestellt werden: a) normierte Verbesserung ($NV = 3,3$) als Abbruchkriterium für die Ausgleichung, b) Sigma NULL a priori (Iteration 1 = 0,5 mm, Iteration 2 = 1 mm) und c) Prozentzahl der maximal zu eliminierenden Punkte in der Ausgleichung (20%). Es werden so lange Punkte bei der Ausgleichung eliminiert, bis keiner mehr den festgelegten Wert für die Normierte Verbesserung überschreitet oder der Schwellwert 20% erreicht wurde.

Exemplarisch sind in Abb. 6 die Ergebnisse des Blocks 5 (Ost- und Westteil) dargestellt,

da dies der größte Block ist. Die Untersuchungen wurden allerdings an allen 20 Blöcken vorgenommen. Es ist ersichtlich, dass sich die Berechnungsergebnisse durch die Änderung des Sigma NULL a priori von 0,5 mm auf 1 mm signifikant verbessert haben. Zusätzlich wurde als Ergebnis protokolliert, dass eine Dachhälfte im Westteil durchschnittlich 960 Punkte und im Ostteil 370 Punkte enthält. Diese Angabe spiegelt die Dichte und die Bebauung des Modells wieder, d.h. im Westteil befinden sich eher weitläufige Häuserblöcke, während im Ostteil der Innenstadt zwischen den Fleeten eine recht dichte Bauweise vorzufinden ist (siehe auch Abb. 4 rechts). Insgesamt benötigte die Software rund 17 Stunden für die Berechnung aller 20 Blöcke und lieferte insgesamt 5437 Gebäude.

Das generierte CAD-Modell wurde abschließend zur Qualitätskontrolle mit der Punktwolke verglichen. In dem Block 5 vom Ostteil des Modells wurden von 1536 Gebäuden nur 115 (7,5%) fehlerhaft berechnet. Für die fehlerhaft berechneten Gebäude wurde zur eindeutigen Kennzeichnung automatisch ein Flachdach erzeugt, das später in manueller Arbeit angepasst bzw. korrigiert wurde. 1257 Gebäude (74,3%) weisen Abweichungen in den Dächern im Bereich zwischen $-0,5$ mm und $+0,5$ mm auf, während 279 Gebäude (18,2%) Abweichungen im kritischen Bereich von -2 mm bis $+2$ mm haben.

4 Modellierung

Die Modellierung beschäftigt sich mit der Generierung von 3D-CAD-Objekten für den Aufbau des historischen 4D-Stadtmodells. Um aus den aufbereiteten Daten vom Streifenprojektionssystem und aus der Karte 3D-Stadtmodelle zu generieren, sind weitere Arbeitsschritte erforderlich.

4.1 Modellierung des Holzmodells

Der Großteil der Gebäude konnte wie schon in Abschnitt 3 beschrieben mit der eigens dafür entwickelten Modellierungssoftware automatisch erstellt werden. Komplexere Gebäude wie z.B. die Kirchen lassen sich allerdings nicht automatisch durch die Software generieren, so dass manuelle Modellierungsarbeit erforderlich war. In dem Programm AutoCAD mit dem Plug-in CloudWorx wurden in der Punktwolke durch Polylinien Grundrisse und Profile erzeugt, aus denen Flächen und Volumenkörper gebildet wurden. Die Körper konnten über boolesche Operatoren (Verschneiden, Summieren, Differenzbildung) miteinander kombiniert werden. Da diese 3D-Modellierung in Punktwolken im Bereich des terrestrischen Laserscannings heute Standard ist, werden hier nicht die einzelnen manuellen Arbeitsschritte beschrieben, sondern es wird auf Literatur mit entsprechenden praktischen Beispielen der HCU Hamburg verwiesen (z. B.

KERSTEN et al. 2006, KERSTEN 2007, KERSTEN et al. 2008). In Abb. 7 ist beispielhaft die Modellierung der Kirche St. Katharinen dargestellt. Ein anschließender 3D-Vergleich von CAD-Modell und Punktwolke hat eine durchschnittliche Abweichung von 0,2 mm ergeben.

Digitales Geländemodell

Aus den Daten des Streifenprojektionssystems wurde nach den Gebäudemodellen auch ein digitales Geländemodell (DGM) abgeleitet. Aufgrund der hohen Datenmenge, der benötigten Rechnerkapazität und der Erfahrung im Bereich Airborne Laserscanning wurde das DGM beim Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung Hamburg (LGV) erstellt, in dem Geländepunkte, Vegetation und Gebäude in der Punktwolke mit der Software TerraModeler der Firma TerraSolid klassifiziert wurden (AXELSSON 1999). Zur DGM-Berechnung wird in der Software ein Raster über das Gebiet gelegt, wobei die Rasterzellen flächenmäßig größer sein müssen als das größte Gebäude. In allen Rasterzellen wird der tiefste Punkt ermittelt, mit denen dann das Geländemodell trianguliert wird. Anschließend werden alle anderen Punkte mit Abstands- und Winkelkriterien überprüft, ob sie auf dem Gelände liegen. Punkte, die diese Kriterien erfüllen, werden zum Gelände hinzugefügt. Dann beginnt eine neue Triangulation, dieser iterative Prozess wird solange fortgeführt, bis er konvergiert. Mit allen Punkten, die als Ge-

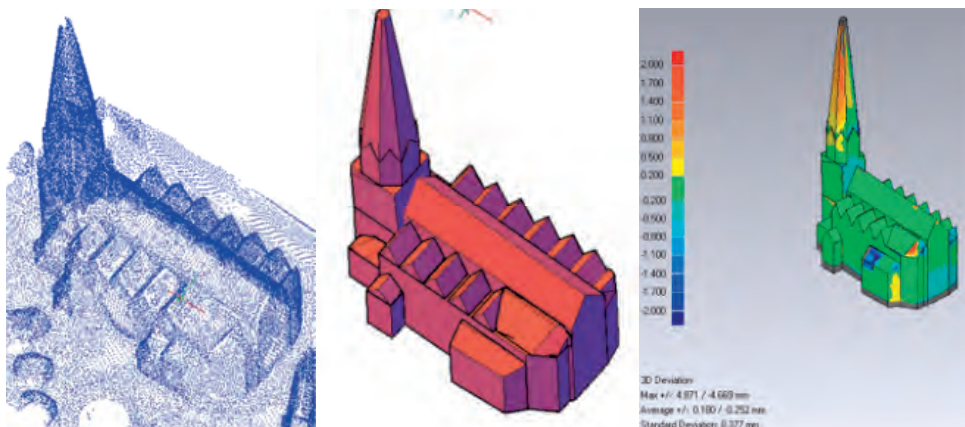


Abb. 7: Der Weg von der Punktwolke über die Modellierung bis zur Kontrolle: Punktwolke (links), CAD-Modell (Mitte) und 3D-Vergleich von CAD und Punktwolke (rechts).

lände klassifiziert werden können, wird abschließend die Geländeoberfläche trianguliert.

Georeferenzierung

Ein großes Problem bei den hier generierten Daten war die Georeferenzierung (Transformation in ein gemeinsames Koordinatensystem), da aus der Zeit von 1644 logischerweise keine Vermessungsdaten existieren. Um das Modell, das mit einem ungefähren Maßstab von 1:1000 vorliegt, zu referenzieren, wurden zunächst die beiden Modellteile zueinander ausgerichtet. Dies erfolgte über manuell gemessene Punkte am Modell sowie an der Unterkonstruktion. Es wurde ein Koordinatensystem mit der 3-2-1 Ausrichtung für eine Platte definiert, ein Punkt auf der Platte, zwei Punkte entlang einer Kante der Unterkonstruktion, sowie drei Punkte in der dargestellten Wasserebene. Die zweite Platte wurde dann mit drei Translationen und drei Drehungen entsprechend in dieses Koordinatensystem transformiert. Die Nahtstelle wurde dann optisch auf Unstetigkeiten hin überprüft, vor allem die Straßen und die Fleete, die über die Nahtstelle hinweg verlaufen. Im Folgenden wurden dann verschiedene Gebäude auf ihre Tauglichkeit als Passpunkt untersucht. Gebäude als Passpunkte zu benutzen, macht natürlich nur Sinn, wenn sie sich über die Jahrhunderte gar nicht oder nur wenig verändert haben. Obwohl solch ein Kriterium meistens Kirchen erfüllten, gab es dennoch große Schwierigkeiten, geeignete Objekte zu finden. So wurde das Hamburger Wahrzeichen, die St. Michaelis Kirche, auch Michel genannt, erst 1647 gebaut und befindet sich daher nicht im Holzmodell. Die Kirche St. Nicolai wurde zwar schon im 13. Jahrhundert errichtet, leider „wanderte“ die Kirche nach dem Großen Brand 1842 ein kleines Stück südöstlich. 1943 wurde sie dann bis auf den Turm komplett zerstört und nicht wieder aufgebaut. Das dritte Beispiel stellt die Kirche St. Katharinen dar, die bereits im Jahr 1256 erwähnt wurde und die trotz An- und Umbauten seit 1644 bis heute ihre charakteristische Form bewahrt hat, so dass Gebäudeecken als Passpunkte eindeutig identifiziert werden konnten. Insgesamt wurden sechs Passpunkte mit UTM-Koordinaten

über das damalige Stadtgebiet verteilt für die 2D-Helmert-Transformation gefunden. Zur Berechnung der Transformation wurde das Ausgleichungsprogramm Panda genutzt. Die Restklaffen an den Passpunkten bewegen sich dabei im Bereich von -4 bis $+6$ m im Rechtswert sowie -1 bis $+2$ m im Hochwert. Dabei stellte sich überraschenderweise heraus, dass das Holzmodell mit einem Maßstab von 1:1250 doch etwas kleiner ist, als bisher bekannt war. Somit stand nun das modellierte und in das UTM-System (WGS84) georeferenzierte Gesamtmodell zur Weiterverarbeitung und Präsentation zur Verfügung.

4.2 Modellierung der digitalisierten Grundrisse aus der Karte

Die Vermessungsarbeiten für die verwendete amtliche Kartenausgabe wurden von 1855 bis 1859 durchgeführt. Die Georeferenzierung der Karte erfolgte durch 2D-Helmert-Transformation von acht Passpunkten (Kirchen und Brücken) in der Software GEOgraf. Die maximalen Klaffen in den Passpunkten lagen bei 0,901 m im Rechtswert und bei 0,456 m im Hochwert. Anschließend erfolgte die manuelle Digitalisierung der Grundrisse aus der Karte mit AutoCAD Map 3D und die Höhenermittlung und Erzeugung der Volumenkörper aus Plänen und Fotos. Die unterschiedlichen Grundlagedaten für die Gebäudehöhen stellen eine heterogene Datenqualität dar, die in Abb. 8 illustriert ist: Grün = Höhe aus Fassadenplänen (maßstäbliche Konstruktionszeich-

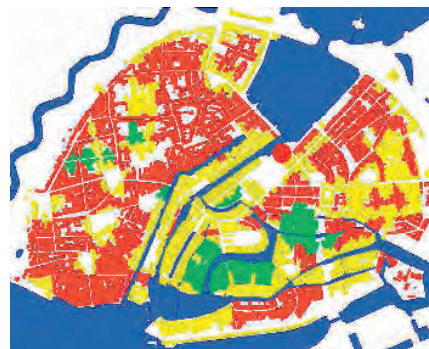


Abb. 8: Übersicht der Gebäudehöhenqualität: Grün = Fassadenaufmaß, Gelb = Bilddaten, Rot = Abschätzung/Alte Karten.

nungen), Gelb = Höhen aus Fotos abgeschätzt und Rot = keine Informationen, Gebäudehöhe aus umliegenden Gebäuden abgeschätzt und entsprechend angepasst. Somit stellen die Höheninformationen in Grün die genauesten und in Rot die unsichersten Quellen dar. Für alle gelb markierten Blöcke lagen eine unterschiedliche Anzahl von Fotos aus einer oder mehreren perspektivischen Ansichten vor. Da es zu zeitaufwändig war, für jedes einzelne

Gebäude eine Höhe abzuleiten, erfolgte die Gebäudehöhenanpassung als Generalisierung blockweise. Dieser Mangel kann allerdings in zukünftigen Arbeiten korrigiert werden, da alle Modelle in der Datenbank einfach und flexibel austauschbar sind. Es ist also möglich, dass in naher Zukunft die gesamte Stadtfläche, die in Abb. 8 dargestellt ist, ihren Status von Rot auf Gelb bzw. Grün wechselt.

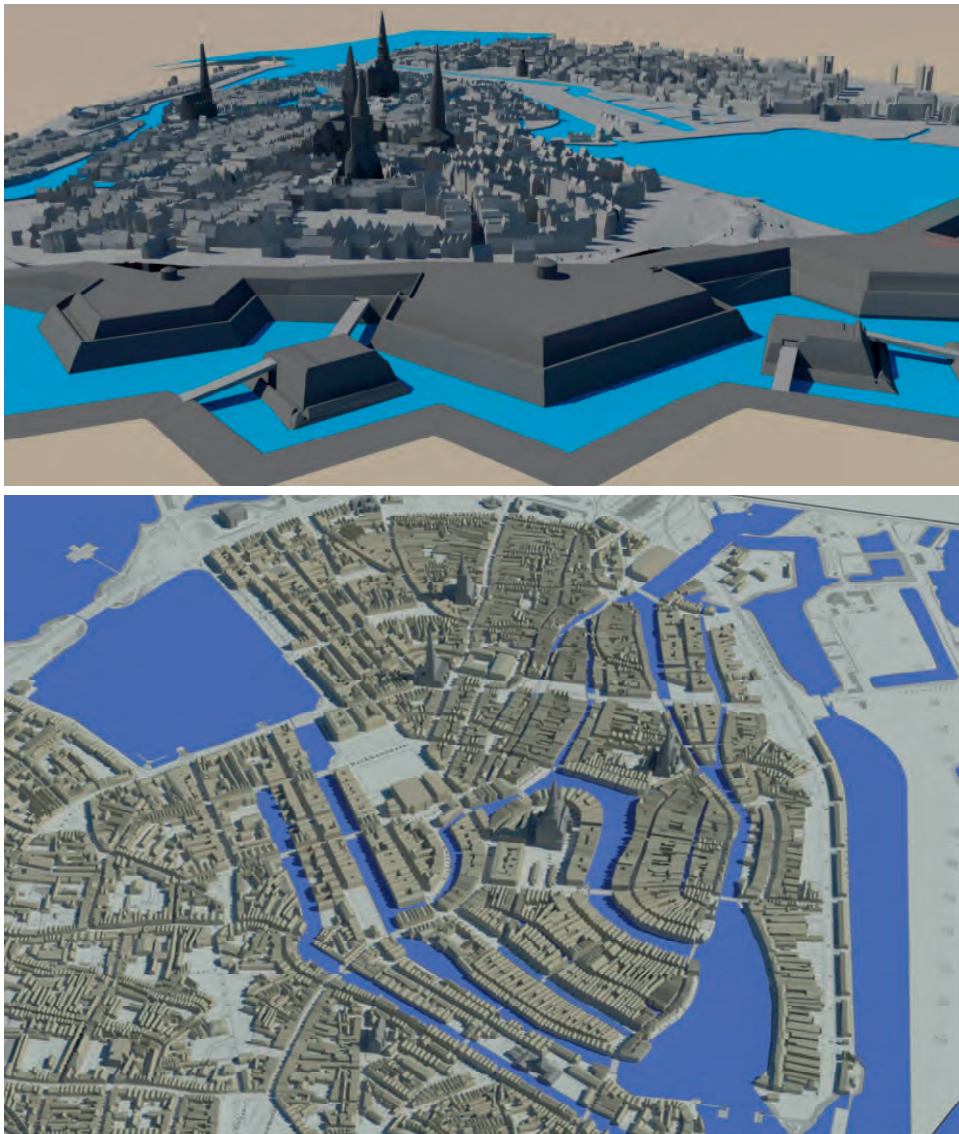


Abb. 9: Ausschnitte des 3D-Stadtmodells der Freien und Hansestadt Hamburg aus dem Jahr 1644 (oben) und 1859 (unten).

Die in der Karte an Straßenkreuzungen eingetragenen Höhenkoten wurden ebenfalls digitalisiert, um daraus später ein DGM berechnen zu können. Insgesamt wurden 345 Höhenpunkte über ein Gebiet von 490 ha ermittelt. Alle Höhen sind auf einen alten Elbflutmesser bezogen. Derzeit gibt es noch keine Verknüpfung zu heute üblichen Höhensystemen, dies soll aber noch realisiert werden.

4.3 Datenexporte

Nachdem alle Modellteile vom Holzmodell und von der Karte modelliert, kontrolliert und georeferenziert vorlagen, wurden diese blockweise in das Standardformat KML/KMZ von Google übertragen, da der digitale Globus von Google als Präsentationsplattform dienen sollte. Die Abb. 9 zeigt die erstellten 3D-Stadtmodelle von Hamburg aus den Jahren 1644 und 1859.

5 Visualisierung

Im letzten Schritt erfolgte die Zusammenstellung der beiden beschriebenen Ausgangs- sowie weiterer Stadtmodelle zu einer Zeitserie. Dieses 4D-Modell wurde auf Basis des virtuellen Globus „Google Earth“ in einem eigenen Browser mit Datenbankbindung visualisiert und erlaubt somit weitere Analysen.

Neben den beschriebenen Ausgangsmodellen wurden weitere Epochen aus historischen Karten und isometrischen Ansichten interpoliert. Insbesondere eignen sich isometrische Ansichten für eine Interpolation früherer Epochen, da bei diesen Darstellungen leicht Informationen über die Anzahl der Gebäude und deren Lage entnommen werden können. Für die erste Epoche im 4D-Stadtmodell wurde die isometrische Ansicht um 1200 ausgewählt, da diese eine der ersten Darstellungen von Hamburg ist, die eine Aussage über die Anzahl der Gebäude zulässt. Es folgt ein Modell auf Basis einer Karte von 1400. Zu diesem Zeitpunkt war der Grundriss der Stadt vollendet und sollte 200 Jahre Bestand haben. Für die dritte Epoche diente die isometrische Ansicht Hamburgs von 1589, da diese Hamburg vor dem Bau der Wallanlagen zeigt. Das Modell von 1644 als vierte Epoche präsentiert Hamburg als stärkste Festung Deutschlands. Die isometrische Ansicht 1700 stellt die fünfte und das Modell von 1859 illustriert die sechste Epoche des 4D-Stadtmodells. Abb. 10 fasst die Zuordnung der Modelle und wichtige historische Ereignisse zusammen.

Für die Extrapolation der Epochen von 1200 bis 1589 diente das Modell von 1644, während die Epoche 1700 auf der oben beschriebenen Kartengrundlage erstellt wurde. Aus den isometrischen Ansichten wurde die Existenz von Straßen und Häuserblocks den verschiedenen Epochen zugeordnet, so dass daraus die 3D-

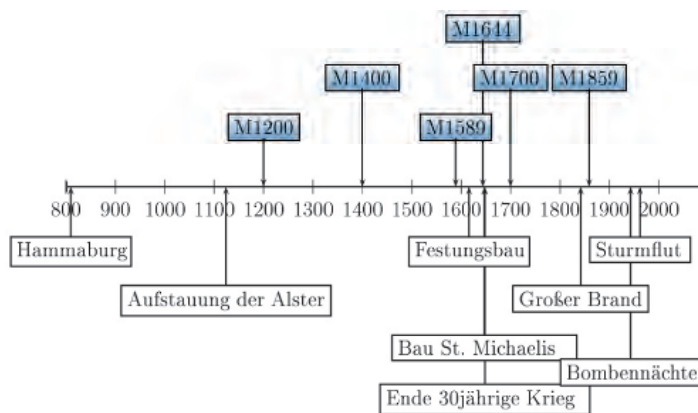


Abb. 10: Zeitschiene der verschiedenen Modellzeitpunkte im Bezug zu historischen Ereignissen der Freien und Hansestadt Hamburg.

Stadtmodelle der vorherigen zeitlichen Epochen abgeleitet werden konnten. Auf diese Weise bekamen alle Häuserblocks einen Zeitstempel, der in eine Datenbank eingetragen wurde. In Abb. 11 ist jeweils ein Ausschnitt

der 3D-Stadtmodelle aus den Jahren 1200, 1400, 1589 und 1700 dargestellt.

Die technische Einbindung des 4D-Stadtmodells in Google Earth (Abb. 12) wurde mithilfe eines selbst entwickelten Programms re-

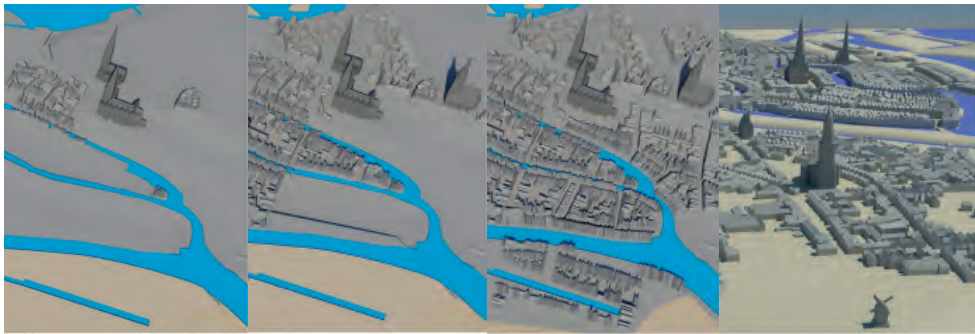


Abb. 11: Ausschnitt des 3D-Stadtmodells der Freien und Hansestadt Hamburg der Jahre 1200, 1400, 1589 und 1700 (v.l.n.r.).

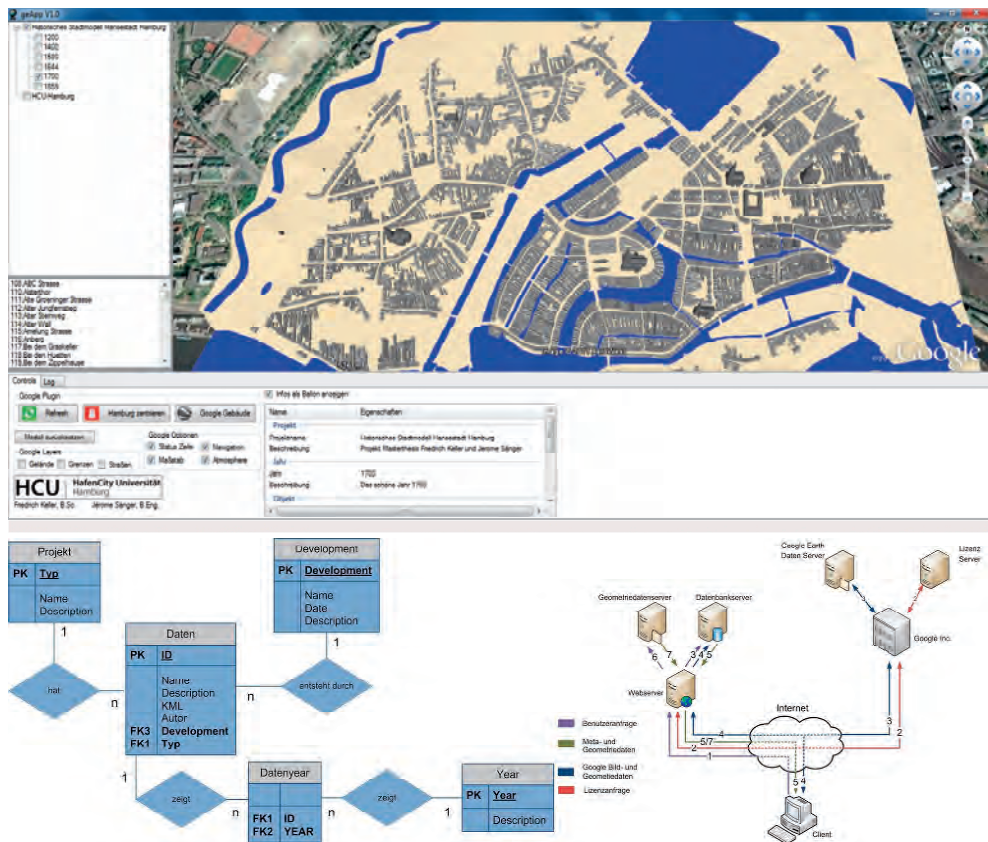


Abb. 12: Aufbau der Darstellungssoftware mit dem Datenbank- und Netzwerkkonzept.

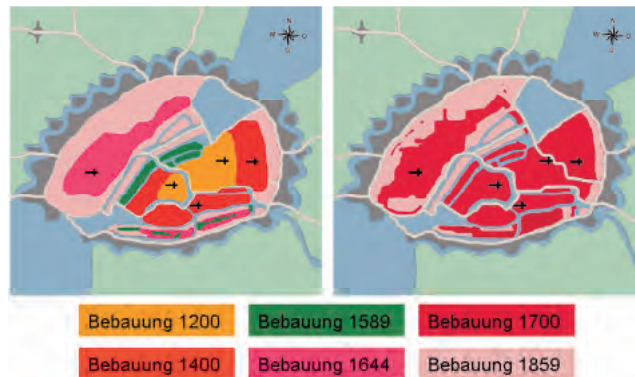


Abb. 13: Entwicklung der bebauten Flächen Hamburgs als Vergleich von 1200 bis 1644 (links) und 1700 bis 1859 (rechts) mit Symbolen der Hamburger Hauptkirchen.

alisiert, das ein Application Programming Interface nutzt und das die Navigation durch das 4D-Stadtmodell mit seinen sechs Epochen sowie die Darstellung von Metadaten (z. B. Entstehung, Beschreibung, Geschichte) zu den einzelnen Objekten ermöglicht. Dabei ist die Modellarchitektur so angelegt, dass jeder Straßenzug bzw. jedes Gebäude nur einmal existiert. Die Gebäudemodelle der verschiedenen Zeitpunkte werden durch das Abrufen der zugehörigen Gebäude zusammengesetzt und dargestellt. Dies wird derzeit noch softwaretechnisch gelöst, die Datenbankstruktur wird aber dahingehend angepasst, dass diese Zuordnung effizienter wird. Für den Zugriff auf das 4D-Modell wurde eine Netzwerkarchitektur geschaffen, die auf einem Client-Server-Modell beruht. Dabei stehen mehrere Server zur Verfügung, die unterschiedliche Datenquellen bereithalten, die bei Bedarf mit Hilfe von SQL-Befehlen auf den Client-Rechner zur Darstellung übertragen werden können.

Mit dieser Konfiguration ist es nun möglich, verschiedene Epochen des historischen Stadtmodells zu visualisieren und multi-temporale Analysen durchzuführen. Beispielsweise zeigt Abb. 13 die flächenmäßige Ausbreitung der Bebauung Hamburgs zwischen 1200 bis 1644 bzw. von 1700 bis 1859.

6 Fazit & Ausblick

In diesem Beitrag ist der Aufbau eines historischen 4D-Stadtmodells der Freien und Hansestadt Hamburg beschrieben worden, in dem aus verschiedenen Datenquellen mit unterschiedlicher Qualität 3D-Stadtmodelle für sechs Zeitepochen abgeleitet wurden. Die Zeitreihe stellt die Entwicklung der Stadt Hamburg bis in das 19. Jahrhundert und in einer möglichen Verbindung mit dem aktuellen 3D-Stadtmodell sogar bis in das 21. Jahrhundert dar. Trotz des hohen Automationsgrades bei der Generierung der Gebäude aus der Punktwolke des Holzmodells mussten wichtige Arbeitsschritte wie die Digitalisierung der Grundrisse, die Modellierung der komplexen Gebäude und die Digitalisierung und Modellierung der Gebäude aus der Karte manuell durchgeführt werden. Daraus ergab sich ein gesamter Projektaufwand von insgesamt 800 Stunden, was bei einem Stundenlohn von € 50 für einen Ingenieur insgesamt einem Projektvolumen von € 40,000 entspricht. Die prozentuale Aufteilung der eingesetzten Arbeitszeit ist in Abb. 14 dargestellt. Sie zeigt, dass fast 50% der Zeit für Digitalisierung und Modellierung benötigt wurde. Im Bereich Digitalisierung liegt sehr großes Optimierungs- bzw. Verbesserungspotential für die Erstellung solcher historischer Stadtmodelle, wenn die Digitalisierung von Grundrissen in Punktwolkenbildern und Karten automatisch erfolgt (NEBIKER & CAROSIO 1994). Die Programmierung bzw. Softwareentwicklung nahm ca.

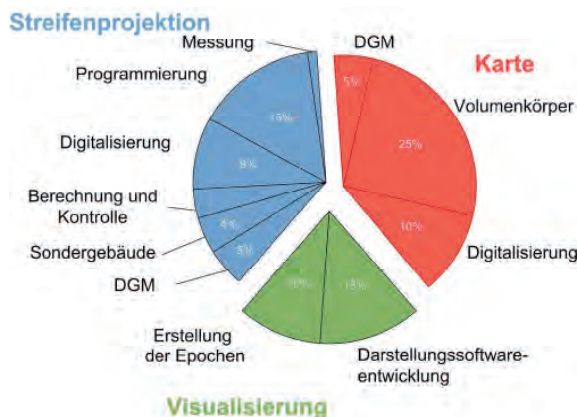


Abb. 14: Zusammenstellung der eingesetzten Arbeitszeit.

30% der Zeit in Anspruch, was bei einem weiteren ähnlichen Projekt deutlich reduziert werden könnte, da dann lediglich Anpassungen der bestehenden Software erfolgen müssten.

Das vorliegende historische 4D-Stadtmodell der Freien und Hansestadt Hamburg stellt nun eine hochinteressante Datengrundlage für viele verschiedene Anwendungen (in der Stadtplanung, Architektur und Geschichte) dar und verspricht, ein enormes Entwicklungspotenzial für ergänzende und vertiefende Arbeiten zu haben. Neben einer Verfeinerung der 3D-Modelle durch detailliertere Gebäude aus Informationen vom Denkmalchutzamt und vom Staatsarchiv könnten weitere Zeitpunkte aus dem 19. und 20. Jahrhundert hinzugefügt werden. So scheinen gerade als wichtige Meilensteine der Hamburger Geschichte der große Brand von 1842, das Groß-Hamburg-Gesetz von 1937 und die Zeit nach der großen Zerstörung durch die Bombenangriffe im Mai 1945 sehr interessant zu sein. Zur Erhöhung der Attraktivität der Modelle könnten die Gebäude mit (synthetischen) Texturen und die Umgebung mit Vegetation versehen werden. Für das Museum kommt zunehmend multimediale Kommunikation durch virtuelle Rundgänge in der mittelalterlichen Stadt in Form von Videos oder durch interaktive Begehung in Betracht. In Zukunft könnten solche historischen digitalen Modelle eine wesentliche Grundlage für benutzergesteuerte Erkundungen historischer Szenen in 3D und

somit aus Museen vielleicht gar nicht mehr wegzudenken sein.

Aus wissenschaftlicher Sicht könnten diese Modelle mit anderen Daten, wie zum Beispiel (historischen) Einwohnerverzeichnissen, verknüpft werden, um neue visuelle oder rechnerische Analysen zu ermöglichen. Zudem wäre der Vergleich des heutigen Stadtmodells mit den historischen Modellen sehr interessant, um die Entwicklung und die Veränderungen der Stadt zu visualisieren.

Literatur

- AXELSSON, P., 1999: Processing of laser scanner data – algorithms and applications. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **54** (2–3): 138–147.
- CANNY, J., 1986: A Computational Approach to Edge Detection. – *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **8**: 679–698.
- CHEVRIER, C., JACQUOT, K. & PERRIN, J.P., 2010: 3D Modelling of a Town Scale Model. – *EuroMed2010, 3rd International Conference dedicated on Digital Heritage, Short Papers*: 99–107; Archaeolingua, Budapest, Ungarn.
- DUDA, R.O. & HART, P., 1973: *Pattern Classification and Scene Analysis*. – Wiley, New York, USA.
- HOUGH, P.V.C., 1962: Method and means for recognizing complex patterns. – U.S. Patent 3.069.654.
- JANSA, J. & STANEK, H., 2003: Ableitung von Stadtmodellen aus Laser-Scanner-Daten, Grundrissplänen und photographischen Aufnahmen. – *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation* **91** (4): 262–270.

- JEDRZEJAS, T., 2008: Aufbau historischer städtischer 3D-Szenarien für eine Nutzung unter Google Earth, basierend auf Daten von terrestrischem Laserscanning, Photogrammetrie und Archivinformationen. – Diplomarbeit, Hochschule Bochum, Fachbereich Vermessung und Geoinformatik.
- JEDRZEJAS, T. & PRZYBILLA, H.-J., 2009: Aufbau historischer 3D-Szenarien am Beispiel der mittelalterlichen Stadt Duisburg. – Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG) **3/2009**: 195–204.
- KELLER, F. & SÄNGER, J., 2010: Automatisierte Generierung von historischen 4D-Stadtmodellen für die Darstellung innerhalb der Google Earth Engine am Beispiel der Freien und Hansestadt Hamburg. – Unveröffentlichte Masterarbeit im Masterstudiengang Geomatik der HafenCity Universität Hamburg.
- KERSTEN, TH., 2007: Virtual Reality Model of the Northern Sluice of the Ancient Dam in Marib/ Yemen by Combination of Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for Archaeological Applications. – International Journal of Architectural Computing, Special Focus on Cultural Heritage Multiscience **05** (02): 339–354.
- KERSTEN, TH., BIEBERMANN, M. & SCHNEIDER, M., 2006: 3D-Erfassung und Modellierung des Duderstädter Westerturmensembles durch Kombination von digitaler Architekturphotogrammetrie und terrestrischem Laserscanning. – Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik: 254–263; Wichmann, Heidelberg.
- KERSTEN, TH., STERNBERG, H., MECHELKE, K. & LINDSTAEDT, M., 2008: Datenfluss im terrestrischen Laserscanning – Von der Datenerfassung bis zur Visualisierung. – Terrestrisches Laserscanning (TLS2008), Schriftenreihe des DVW, Band **54**: 31–56; Wißner, Augsburg.
- LUHMANN, T., 2010: Nahbereichsphotogrammetrie. – Grundlagen – Methoden – Anwendungen. – 3. Auflage; Wichmann Verlag.
- NEBIKER, S. & CAROSIO, A., 1994: Automatic Extraction and Structuring of Objects from Scanned Topographical Maps. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing **30** (1): 180–187.
- NEBIKER, S., BARMETTLER, A., FISCHER, B. & WEBER, E., 2009: Vom physikalischen Stadtmodell zum historischen 3D-GIS – Anforderungen und Lösungsansätze am Beispiel des historischen Solothurns. – Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG) **3/2009**: 205–219.
- REMONDINO, F. & EL-HAKIM, S., 2006: Image-based 3D Modelling: a Review. – The Photogrammetric Record **21** (115): 269–291.
- SEDLACEK, D. & ZARA, J., 2009: Graph Cut Based Point-Cloud Segmentation for Polygonal Reconstruction. – Lecture Notes in Computer Science **5876**: 218–227; Springer.

Adressen der Autoren:

Friedrich Keller, Thomas P. Kersten und Jochen Schiewe, HafenCity Universität Hamburg, Hebebrandstraße 1, D-22297 Hamburg, Tel.: +49-40-42827-5391, Fax: +49-40-42827-5399, e-mail: Friedrich.Keller, Thomas.Kersten, Jochen.Schiewe@hcu-hamburg.de

Jérôme Sängér, Hospitalstraße 8, D-06536 Bennungen, e-mail: jerome.saenger@t-online.de

Manuskript eingereicht: Januar 2011

Angenommen: März 2011



Berichte von Veranstaltungen

ISPRS Kommission IV Symposium „Geospatial Data and Geovisualisation: Environment, Security, and Society“ vom 15.–19. November 2010 in Orlando, USA

Das Symposium der ISPRS Kommission IV war das letzte Zwischensymposium im Jahr 2010 und fand im Doubletree Hotel in Orlando, Florida statt. Das Symposium wurde dieses Jahr zusammen mit der AutoCarto 2010 und der ASPRS/CaGIS Konferenz veranstaltet. An der gemeinsamen Konferenz nahmen nach Angabe der Organisatoren insgesamt 567 Wissenschaftler teil, was für ein Zwischensymposium eine sehr hohe Anzahl von Teilnehmern darstellt. An den beiden Tagen vor der eigentlichen Konferenz fanden insgesamt dreizehn Workshops zu aktuellen Themen aus dem Bereich der Geoinformatik statt.

In der Eröffnungsveranstaltung begrüßten Prof. OHARN ALTAN, Präsident der ISPRS, Prof. WILLIAM CARTWRIGHT, Präsident der ICA (International Cartographic Association) und Prof. RONALD F. ABLER, Präsident der IGU (International Geographical Union) die Teilnehmer und sprachen die Eröffnungsworte. Prof. CLIFF OGLEBY gab eine kurze Präsentation zum kommenden ISPRS-Kongress im Jahr 2012 in Melbourne, Australien, sowie Dr. ANNE RUAS eine Präsentation zum kommenden ICA-Kongress 2011 in Paris, Frankreich.

An den folgenden drei Tagen fanden insgesamt 36 technische Sitzungen, acht Sondersitzungen zu ausgewählten Themen, vier Keynote-Sitzungen sowie eine Postersitzung während des Empfangs der Aussteller statt. Die technischen Sitzungen verteilten sich auf 19 ISPRS, 13 AutoCarto und vier ASPRS/CaGIS Sitzungen. Weiterhin fanden insgesamt 14 Arbeitssitzungen der unterschiedlichen teilnehmenden Organisationen statt.

Betrachtet man die zahlenmäßige Verteilung der Beiträge in den verschiedenen Arbeitsgruppen, lassen sich drei Schwerpunkte des diesjährigen ISPRS-Symposiums identi-

zieren. Den ersten Schwerpunkt bildet die Datenerfassung aus hoch aufgelösten Bildern, die vor allem Bestandteil der Arbeiten der Arbeitsgruppe IV/3 **Kartierung von hoch aufgelösten Daten** ist. Diese Arbeitsgruppe stellt schon seit langer Zeit einen Schwerpunkt der ISPRS Kommission IV Beiträge dar. Der zweite Schwerpunkt findet sich in der Arbeitsgruppe IV/6 **Globale Interoperabilität von Digitalen Höhenmodellen**. Hierbei befassten sich die meisten Beiträge mit dem globalen 30 m Höhenmodell „Aster Global Digital Elevation Model“, welches am 29.6.2009 von der NASA und dem japanischen Ministerium für Wirtschaft, Handel und Industrie (METI) freigegeben wurde. Der dritte Schwerpunkt findet sich in der Arbeitsgruppe IV/7 **Planetarische Kartographie und Datenbanken** vor allem mit Arbeiten zur kartographischen Erfassung des Mondes und des Mars.

Die Beiträge des ISPRS-Symposiums werden im ISPRS Band XXXVIII Teil 4 publiziert. Ausgewählte Beiträge der AutoCarto Konferenz werden in einer Sonderausgabe des „Cartography and Geographic Information Science Journal“ im April 2011 veröffentlicht. Außerdem wurden alle Beiträge als CD-ROM an die Konferenzteilnehmer ausgegeben.

Insgesamt stellte sich die Kombination des ISPRS-Symposiums mit der AutoCarto 2010 und der ASPRS/CaGIS Konferenz als gute Symbiose dar, da sich die Inhalte sehr gut ergänzten. Die Schwerpunkte der AutoCarto-Beiträge lagen vor allem in den Themenbereichen Digitale Kartographie, Geo-Visualisierung und Web-basierte Systeme, wogegen sich die ASPRS/CaGIS-Beiträge vor allem mit Anwendungen aus den Bereichen Stadtentwicklung und Umweltmonitoring beschäftigten.

Allerdings waren für die Vielzahl von Vorträgen nur insgesamt ein ganzer und zwei halbe Tage vorgesehen, was dazu führte, dass in einer Sitzung mit 75 Minuten bis zu fünf Vorträge gehalten wurden und immer jeweils fünf technische Sitzungen parallel stattfanden. Dadurch waren die Vorträge und Diskussionen zeitlich sehr begrenzt und es war einem nur möglich, einen kleinen Teil der Vorträge zu

besuchen. Zudem wurden von den Veranstaltern keine Präsentationsrechner bereitgestellt, was zur Folge hatte, dass zwischen zwei Vorträgen jeweils eine Verzögerung eintrat, da jeder Redner zunächst seinen eigenen Rechner anschließen musste.

Alles in allem jedoch war das Symposium eine hervorragende Möglichkeit zum gegenseitigen Informationsaustausch und zeichnete sich durch eine gute Organisation vor Ort aus. Durch die Wahl von Orlando als Tagungsort gab es zudem eine Vielzahl touristischer Ausflugsziele, so dass auch Begleitpersonen auf ihre Kosten kamen. Vielen Dank an die Organisatoren für die Ausrichtung des Symposiums.

VOLKER WALTER und MICHAEL PETER, Stuttgart

TLS 2010 – Terrestrisches Laserscanning mit TLS Challenge vom 6.–7. Dezember 2010 in Fulda

Das 101. DVW-Seminar zum Themenkreis „Terrestrisches Laserscanning“ fand am 6. und 7. Dezember 2010 in den Räumlichkeiten des Hotels Esperanto, Fulda, statt. Verantwortlich für die Durchführung waren die DVW Arbeitskreise 4 – Ingenieurgeodäsie und 3 – Messmethoden und Systeme. Mehr als 120 Teilnehmer aus Verwaltung, Dienstleistungsbereich und Hochschulen waren zur Veranstaltung gemeldet, darunter ein nicht unerheblicher Anteil Studierender, für die das Seminar eine wertvolle Erweiterung zu den Vorlesungen darstellt.

„Das Terrestrische Laserscanning (TLS) ist ein inzwischen etabliertes Messverfahren und bietet für das Fachgebiet der Geodäsie enorme Perspektiven sowohl innerhalb der klassischen Berufsfelder als auch in angrenzenden Bereichen“. Diese Feststellung der Seminar-Organisatoren im Einladungsschreiben beschreibt zutreffend die aktuelle Situation dieser immer noch jungen Technologie und verweist deutlich auf zukünftige Möglichkeiten der Weiterentwicklung und Anwendungen. Verteilt auf insgesamt vier Sessions wurden zehn Fachbeiträge vorgestellt, ergänzt um Kurzpräsentationen von Diplom-, Bachelor- und Masterarbei-

ten zum Thema TLS sowie fünf Beiträgen zum „TLS-Challenge“.

Die erste Session „TLS und Photogrammetrie“ wurde durch einen Beitrag von THOMAS LUHMANN (Jade Hochschule Oldenburg) mit dem Titel „Kombination von Laserscanning und Photogrammetrie – Potenziale und Grenzen“ eröffnet. In seinem systematisierenden Vortrag zeigte er die Leistungsmerkmale der unterschiedlichen Messsysteme sowie die Vorteile, die sich aus einer kombinierten Nutzung ergeben. Dass photogrammetrische Ansätze, z. B. bei der Georeferenzierung von Scans durch Bündelausgleichung, eine wichtige Rolle spielen und vermehrt hybride Messsysteme in den Markt gelangen, war wahrscheinlich für viele Teilnehmer eine interessante Feststellung. Im Anschluss berichtete FREDIE KERN (FH Mainz) über einen „Vorschlag für ein binäres, offenes Austauschformat“. Obwohl zwischenzeitlich eine Vielzahl von Scanformaten definiert ist, ist der systemübergreifende, operationelle Datenaustausch noch eine Vision. Mit dem so genannten „Open Scan Format – OSF“ wurde eine Format-Spezifikation vorgestellt, die auf Initiative des „Offenen Forums Terrestrisches Laserscanning“ (www.laserscanning.org) entwickelt wurde und von allen Herstellerfirmen in ihre Software integriert werden kann.

Sechs Posterbeiträge verschiedener Hochschulabsolventen nahmen am Wettbewerb um den von ÖbVI Petersen, Gelsenkirchen, ausgelobten, gleichnamigen Preis teil. Den ersten Platz teilten sich die Masterarbeit von JOHANNES BUREICK (TU Hannover) mit dem Titel „Herleitung von Deformationen aus 3D Laserscans“ sowie FRIEDRICH KELLER und JÉRÔME SÄNGER (HCU Hamburg) mit ihrer Masterarbeit „Automatische Generierung von historischen 4D-Stadtmodellen für die Darstellung innerhalb der Google Earth Engine am Beispiel der Freien und Hansestadt Hamburg“.

Breiten Raum nahm eine Neuerung des TLS-Seminars 2010 in der zweiten Session ein, der sogenannten „TLS Challenge“. Ziel dieses Vergleichs, der im klassischen Sinne keinen „Wettbewerb mit Siegern und Verlierern“ darstellen sollte, war eine gewisse Transparenz in die Arbeitsabläufe der Hersteller zu bringen. Die fünf teilnehmenden Herstellerfirmen (Leica Geosystems, Optech, Riegl,

Trimble sowie Zoller + Fröhlich) mussten zu diesem Zweck ein identisches Gebäudeobjekt der TU Braunschweig erfassen und ihren Workflow von der Erfassung bis zur Ableitung vorab definierter Produkte vorstellen.

Der betriebene Aufwand der Hersteller sowie Inhalte und Ergebnisse der Präsentationen waren – wie zu erwarten – durchaus verschieden. So wurde z. B. deutlich, dass die vorgestellten Scanner für die durchzuführende Messung unterschiedlich geeignet waren. Da das Gebäude über relativ kurze Distanzen zu erfassen war, erwies sich dieses als eher nachteilig für die Scanner hoher Reichweite. Auch die kombinierte Nutzung verschiedener Scanner eines Herstellers (z. B. „short“ und „mid-range“ Systeme) stellt eine eher untypische Vorgehensweise in der Praxis dar. Noch deutlicher wurden die Unterschiede im Bereich der Auswertung. So ist die Modellierung eines Gebäudes, das sich im Wesentlichen durch geometrische Primitive beschreiben lässt, über eine Dreiecksvermaschung sicher nicht repräsentativ, wurde aber durchaus als ein möglicher Lösungsansatz für die Auswertung vorgestellt.

Für die anwesenden Zuhörer, als auch für die präsentierenden Firmen, waren die Beiträge ausgesprochen interessant und aufschlussreich, so dass an dieser Stelle bereits über eine Fortsetzung des „Challenge“ zum nächsten Seminar diskutiert wurde.

Der zweite Seminartag begann mit der Session „Anwendungen im Ingenieurbereich“. OTTO HEUNECKE, INGO NEUMANN & KAY NICHELMANN (UniBw München) berichteten über die „Vermessung von Bohrspülwerken mittels TLS“. Hieran schloss sich die Präsentation von DIRK ELING, Essen, „TLS für Aufgaben der Bauwerksüberwachung“, in der ein von ihm im Rahmen seiner Dissertation entwickelter methodischer Ansatz vorgestellt wurde. JOHANNES OHLMANN-LAUBER (TU München) berichtete nachfolgend über die Entwicklung eines TLS-Monitoring Systems zur flächenhaften Objektüberwachung in naher Echtzeit („TLS für Felssturzbeobachtungen“), mit dem Ziel des zukünftigen Aufbaus eines TLS-basierten Alarmsystems. Einen Blick unter Tage gewährte zum Abschluss RAINER KUCHENBECKER (DMT, Essen) in seinem Beitrag über „Sub-Terrestrisches Laserscanning

– Anwendungsbeispiele aus dem Bergbau unter Tage“. Dabei stellte er u. a. das explosionsgeschützte System IMAGER 5006EX der Firma Zoller + Fröhlich im Einsatz vor und zeigte in interessanten Bildern die besonderen Herausforderungen der untertägigen Vermessung.

Die abschließende Session war dem Themenkreis „Standardisierung und Algorithmen“ gewidmet. Der Beitrag von GUDRUN WENDT und RÜDIGER JOBST (PTB Braunschweig) mit dem Titel „3D-Vermessung großer Lagerbehälter mittels Laserscanning“ zeigte Vorgehensweisen zur geometrischen Vermessung großer Flüssigkeitsbehälter. Neben der reinen Messtechnik stand dabei im Vordergrund, das Messsystem hinsichtlich seiner Tauglichkeit für eichfähige Messungen zu prüfen. Als Ergebnis der Aktivitäten konnte der Nachweis geführt werden, dass das TLS-Verfahren den Anforderungen des gesetzlichen Messwesens genügt. Als Nicht-Geodät eher ein „Exot“ in der Reihe der Vortragenden berichtete der Informatiker ANDREAS SCHILLING (Universität Tübingen) über „Analysis by Synthesis – Modellbasierte 3D-Rekonstruktion“. Die eingesetzten Abs-Algorithmen werden im Bereich computergestützter Bildauswertung und Computergrafik eingesetzt. Mit Beispielen, u. a. zur Schätzung von Position, Ausrichtung und Beleuchtung von Objekten, zur automatischen Rekonstruktion von 3D-Gesichtsmodellen aus 2D-Bildern sowie aus dem Bereich der Verarbeitung von LiDAR-Daten konnte er eindrucksvoll die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Algorithmen aufzeigen.

Mit dem Titel „Geometrische und stochastische Modelle für die integrierte Auswertung von TLS-Daten und photogrammetrischer Bilddaten“ war der Vortrag von DANILO SCHNEIDER (TU Dresden) benannt. Im Mittelpunkt stand hierbei die konsequente Nutzung der fusionierten Scan- und Bildmesstechniken. Die zu diesem Zweck entwickelten Algorithmen, die u. a. eine Verwendung unterschiedlicher Kameras (Panoramakamera, Fisheye-Objektive) in Verbindung mit terrestrischen Laserscannern erlauben, wurden vorgestellt und in praktischen Beispielen vertieft erläutert. Die abschließende Präsentation von DIETER FRITSCH (Universität Stuttgart) war

überschrieben mit „Mit Blick auf mehr Intelligenz im TLS“ und behandelte die Vision eines „smarten“ TLS-Systems, „welches vollautomatisch verschiedene Scanwelten in einem Guss zusammenführt“ und auch im Bereich der Auswertung deutliche Automatisierungsvorteile im Vergleich zu marktgängigen Softwareprodukten aufweisen soll. Laufende Entwicklungsarbeiten aus dem Bereich Computer Vision, auch seines Instituts, wurden vorgestellt.

Alle Vorträge wurden durch interessante Diskussionen begleitet. Raum hierfür bot insbesondere auch das gemeinsame Abendessen im Tagungshotel, dessen brasilianisches Restaurant südamerikanische Lebensfreude nach Fulda bringt. Alle Beiträge zur Tagung sind in der DVW-Schriftenreihe, Band 64, publiziert.

HEINZ-JÜRGEN PRZYBILLA, Hattingen

Range-Imaging Sensors and Applications Workshop vom 27.–28. Januar 2011 in Trient, Italien

Der erste „Range-Imaging Sensors and Applications Workshop“ (RISA 2011) wurde vom 27.–28.1.2011 in Trient, Italien abgehalten. Die Veranstaltung wurde an der Fondazione Bruno Kessler ausgerichtet und von DAVID STOPPA und FABIO REMONDINO organisiert. Sie bestand im Kern aus 18 eingeladenen Vorträgen aus Forschung und Industrie. Dazu waren drei Anbieter (MESA, Optrima und PMD) mit Ausstellungsständen vertreten. Thema des Workshops waren ausschließlich laufzeitbasierte Distanzkameras. Die große Aktualität des Themas und die Qualität der eingeladenen Vorträge lassen sich am großen Zuspruch von über 90 Teilnehmern ablesen. An jedem der beiden Tage wurden jeweils im Wechsel zwei Sitzungen zu Themen aus der messtechnischen Anwendung und eine Sitzung zu Themen aus der Sensorentwicklung abgehalten. Damit ergab sich ein abwechslungsreicher Dialog aus Halbleitertechnologie und Messtechnik. Das detaillierte Programm findet sich online unter risa2011.fbk.eu.

Bei der Entwicklung der Sensoren lässt sich zusammenfassen, dass die derzeitige Pixel-

Technologie noch relativ große Pixel mit einem Pixel-Pitch von typischerweise mehr als 30 Mikrometern benötigt. Damit sind in absehbarer Zeit keine wesentlichen Kostensenkungen oder drastische Steigerungen in der Auflösung zu erwarten. Eine Verbesserung könnte eine neue Technologie, die sogenannte Single-Photon Avalanche Diode (SPAD), bringen. In Zukunft sollen sich hiermit Pixel kleiner als 20 Mikrometer realisieren lassen. Im Vergleich zur derzeitigen Technologie der reinen Bild-Sensoren besteht allerdings immer noch ein deutlicher Abstand.

Die Welt der Anwendungen teilt sich in den Massen-Markt und Nischen-Anwendungen. Zum Massenmarkt zählen derzeit Anwendungen der Unterhaltungselektronik und aus dem Bereich Automotive. Die Vorträge zu den Anwendungen stammten überwiegend aus Hochschulen und Forschungseinrichtungen. Somit überwogen naturgemäß die Nischen-Anwendungen. Es lässt sich zusammenfassen, dass die derzeit verfügbaren Kameras mit einem hohen Maß an Rauschen zu kämpfen haben. Zudem ergeben sich zusätzliche Probleme durch Umgebungseinflüsse, wie Temperatur, Umgebungslicht und mechanische Einwirkung. Die Hersteller betonen jedoch, dass für spezifische Sensoren, die gezielt für einzelne Anwendungen entwickelt werden, diese Probleme beherrschbar seien.

Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass die Veranstaltung durch ein hervorragendes Beiprogramm abgerundet wurde, bei dem die kulinarischen Vorzüge der Region zur vollen Geltung kamen. Die Ankündigung der Veranstalter diesen Workshop als eine alle zwei Jahre stattfindende Reihe zu etablieren, kann man daher mit großer Freude entgegensehen.

JAN BÖHM, London, Großbritannien

10. Oldenburger 3D-Tage vom 1.–3. Februar 2011

Anfang Februar 2011 fanden in Oldenburg an der Jade Hochschule Wilhelmshaven, Oldenburg, Elsfleth zum zehnten Mal die Oldenburger 3D-Tage statt. Prof. Dr. THOMAS LUHMANN und sein Team vom Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik (IAPG)

luden zur Jubiläumsveranstaltung ein, die auch in diesem Jahr wieder durch Dipl.-Ing. CHRISTINA MÜLLER und ihren Kollegen/innen organisiert wurde. Kooperationspartner für die Durchführung der Veranstaltung waren das Institut für Mess- und Auswertetechnik der Jade Hochschule, das Institut für Innovations-Transfer Emden und der Arbeitskreis Optische 3D-Messtechnik der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformatik e.V. (DGPF). Wie immer wurde den Besuchern neben den Fachvorträgen auch eine Firmenausstellung mit insgesamt 23 Ausstellern geboten. Die Themenschwerpunkte dieses Jahres lagen in den Bereichen Dynamische Prozesse, Oberflächenerfassung, Navigation von Objekten und Sensoren, Mobile Plattformen und Systeme, Neue Sensoren und Systeme und Messunsicherheit und Standardisierung.

Da in diesem Jahr mit den zehnten 3D-Tagen ein Jubiläum anstand, wurde der Beginn der Veranstaltung dieses Mal schon auf den Dienstagnachmittag gelegt. Nach einem kleinen Rückblick auf die Veranstaltungen der vergangenen neun Jahre durch THOMAS LUHMANN wurden die Grußworte verschiedener Institutionen überbracht. Zunächst sprach Dr. JOSEF LANGE, Staatssekretär des Niedersächsi-

schen Ministeriums für Wissenschaft und Kultur. Anschließend lobte der Präsident der Jade Hochschule, Herr Dr. ELMAR SCHREIBER diese etablierte und äußerst erfolgreiche Veranstaltung an seiner Hochschule. Abschließend sprach Prof. THOMAS KERSTEN als Leiter des Arbeitskreises Optische 3D-Messtechnik kurze Grußworte im Namen der DGPF. Es folgte der Eröffnungsvortrag mit dem Titel „3D modeling everywhere – towards a digital earth“, gehalten von Dr. FABIO REMONDINO von der Bruno Kessler Foundation in Trient, Italien. Er beeindruckte die Zuhörer mit einer Menge an Bildern und 3D-Modellen aus der ganzen Welt, und zeigte dabei den heutigen Stand der Technik, die Möglichkeiten und die Grenzen auf.

Am Abend fand die Geburtstagsfeier der Veranstaltung im Mensa-Gebäude der Hochschule statt. Alle Teilnehmer waren eingeladen, sich am leckeren Büffet zu bedienen und sich an der Bar mit Getränken versorgen zu lassen. Höhepunkt war die Ehrung der sechs Personen, die an allen zehn Veranstaltungen teilgenommen haben: Carlos Acevedo und Thomas Kersten von der HCU Hamburg, Heinz-Jürgen Przybilla von der Hochschule Bochum, Nikolaus Studnicka von der Firma Riegl LMS GmbH, Christoph Effkemann von



Eröffnung der 10. Oldenburger 3D-Tage: Dr. ELMAR SCHREIBER (Präsident der Jade Hochschule), Prof. Dr.-Ing. THOMAS LUHMANN (Veranstalter der Oldenburger 3D-Tage) und Prof. THOMAS KERSTEN (Leiter des DGPF Arbeitskreises Optische 3D-Messtechnik). (Foto: PIET MEYER, IAPG Oldenburg).



Ehrung der Jubilare der 10. Oldenburger 3D-Tage (v.l.n.r.): H.-J. PRZYBILLA (Hochschule Bochum), N. STUDNICKA (Riegl LMS GmbH), Th. KERSTEN und C. ACEVEDO (beide HCU Hamburg), C. EFFKEMANN (Phocad GmbH) und H. BROERS (Axios 3D Services) zusammen mit Organisatoren C. MÜLLER und T. LUHMANN (Jade Hochschule).

der Phocad GmbH und Holger Broers (Axios 3D Services).

Mittwochmorgen pünktlich um 9:00 Uhr starteten die ersten beiden von insgesamt elf Sessions mit den Fachvorträgen, die durch zwei Ausstellerforen ergänzt wurden. Den Bereich Laserscanning eröffnete KLAUS MECHSELKE (HafenCity Universität Hamburg) mit einem Vortrag über geometrische Genauigkeitsuntersuchungen aktueller terrestrischer Laserscanner, gefolgt von THOMAS MARTIENSSEN (TU Freiberg), der sich ebenfalls mit der Messgenauigkeit von Laserscannern, in seinem Fall jedoch unter Tage, beschäftigte. SHAHZAD SAYYAD (Leibniz Universität Hannover) zeigte einen Vergleich verschiedener Registrierungsmöglichkeiten von Punktwolken, darunter eine Intensitätsbild-basierte Registrierung sowie ein neu entwickeltes Target, das vollautomatisch detektiert und gemessen werden kann. THOMAS KERSTEN (HafenCity Universität Hamburg) schloss die Session mit seinem Bericht über die erfolgreiche Integration eines Laserscanners auf einem Multi-Sensor-Schiff für Anwendungen im Hamburger Hafen ab.

In der Parallelsession gab es vier Vorträge zum Thema Oberflächenerfassung. ROBERT KOSCHITZKI (TU Dresden) zeigte, dass die pho-

togrammetrische Bestimmung von Rissbreite und Risswachstum durch Korrelationsverfahren auf einer mit Textur versehenen Steinfläche möglich ist und zukünftig in einem Monitoringsystem genutzt werden kann. Im zweiten Beitrag untersuchte THOMAS SCHAEFER (TU München) die Verfälschung des Entfernungssignals eines reflektorlosen Laserdistanzmessers in Abhängigkeit von Oberflächenbeschaffenheit und Winkel. Simulationsberechnungen ermöglichen die rechnerische Korrektur der Rohmessstrecken. Eine Weiterentwicklung der reflektorlosen Distanzmessung könnte zukünftig im Sinne der „Full Waveform Analysis“ geschehen, d.h. die Untersuchung der gesamten zeitlichen Signalform ermöglicht dann die Berücksichtigung der Mehrfachdetektion von Objekten im Messstrahl und es könnten weiterhin Rückschlüsse auf die Objektoberfläche gezogen werden. Der dritte Vortrag wurde von BRITTA GERKEN von der Fraunhofer Einrichtung Elektronische Nanosysteme vorgestellt. Für die Erfassung von elektromagnetischen Nahfeldern elektronischer Baugruppen ist zur Steuerung der Messsonde ein hochgenaues dreidimensionales Modell der Baugruppen mit optischer Messtechnik zu erfassen. Mittels Lasertriangulation und geeigneten Filterungen sowie Fusion mehrerer Messungen

wurden erste brauchbare Ergebnisse erzielt. Das System soll zukünftig durch perspektivische Korrektur der Bilder, Rauschunterdrückung und Belichtungsregelung weiter optimiert werden. Der letzte Vortrag der Session kam wiederum von der TU Dresden: MIRKO RIEDEL zeigte am Beispiel einer messtechnischen Untersuchung von Kardangelenken das Potenzial photogrammetrischer Messverfahren im industriellen Umfeld. Erste Ergebnisse zeigen die prinzipielle Machbarkeit der Gelenkuntersuchung und erlauben eine Prognose des erreichbaren Genauigkeitspotenzials. Zukünftig soll die vorgestellte Modellierungsumgebung um weitere Messsysteme erweitert und zur Posemessung an Werkzeugmaschinen verwendet werden.

In der zweiten Session zum Thema Laser-scanning wurde die Abschlussarbeit von FLORIAN OTTE und JOHANNES ZIMMERMANN (Uni Osnabrück) zur automatisierten Erkennung von Scanschatten in Punktwolken präsentiert. Diese verbleibenden Lücken können dann von einer berechneten, optimalen Position aus gefüllt werden. CHRISTIAN MANTHE von der TU Berlin referierte über eine Methode, Ebenen über RANSAC in der Punktwolke zu detektieren und daraus Gebäudemodelle zur 3D-Bestandsdokumentation zu generieren. STEFFEN HERBORT (TU Dortmund) stellte einen Algorithmus vor, bei dem photometrische Informationen (Shape from Shading) und aktive Entfernungsmessungen durch TLS, Streifenprojektion und ToF-Kameras zur 3D-Objektrekonstruktion fusioniert wurden. ANDREAS NÜCHTER (Jacobs Universität Bremen) beschloss die Session mit der Möglichkeit, durch eine Octree Datenstruktur Punktwolken von bis zu einer Milliarde Punkten effizient und platzsparend zu verwalten und zu verarbeiten.

Die parallel laufende Sitzung war überschrieben mit dem Thema Sensoren und 3D-Rekonstruktion. Der erste Vortrag von JAN HIERONYMUS von der Humboldt-Universität zu Berlin zeigte die Ergebnisse eines Vergleichs dreier low-cost Sensoren: Der Stereokamera Fuji REAL 3D, der Range Kamera Kinect und des auf dem Lichtschnittverfahren basierenden DAVID-Scanners. An einem 3D Testobjekt wurde das Potenzial der drei Geräte bzw. Verfahren herausgearbeitet. Die Lösungen liefern durchaus brauchbare Ergebnisse bei ge-

eigneter Vorverarbeitung der Punktwolken. Die Auswertung der Stereokamera erfordert noch zusätzliche Nachbearbeitung in Richtung Rauschfilterung und Glättung der Punktwolken. ANSGAR BRUNN (FH Würzburg-Schweinfurt) präsentierte die Eignung des DAVID-Scanners beim Einsatz in der Lehre sowie technische Rahmenbedingungen und Ergebnisbeispiele. Allerdings handelt es sich bei dem Verfahren nicht um ein Streifenmesssystem, sondern um eine Methode, bei der mittels Linienlaser und WEB-Kamera die gesuchten 3D-Objektpunkte per Lichtschnittverfahren bestimmt werden. MARTIN SCHAFER (Friedrich-Schiller-Universität Jena) zeigte in seinem Vortrag, dass die Nutzung statistischer Muster in der Streifenprojektion folgende Vorteile hat: hohe Flexibilität, um bis zu 40% reduzierte Messzeit gegenüber herkömmlichen Verfahren und bis zu 20% geringere Messunsicherheit bei der Korrelation von Streifenmustern und statistischen Mustern. Die abschließende Präsentation kam von ANDREAS BREITBARTH vom Fraunhofer IOF. Durch geeignete mathematisch-geometrische Verfahren, die auf der Auswertung der bekannten Epipolarometrie basieren, konnte ein Streifenlichtsensor entwickelt und getestet werden, der 3D-Objektpunkte mit einer Frequenz von bis zu 15 Hz erfassen kann.

Anschließend bot sich über die lange Mittagspause Gelegenheit zur Erkundung der Firmenausstellung. Hier waren insgesamt 23 Aussteller vertreten: Leica Geosystems und Hexagon Metrology, kubit GmbH, Milan Geoservice GmbH, Scalypso, Linearis3D GmbH, Nikon Metrology GmbH, Faro Europe GmbH, Automated Precision Europe GmbH, Riegl LMS GmbH, Zoller + Fröhlich GmbH, geokonzept GmbH, ULFTTELLER 3D-Druck, CPA Systems GmbH, Topcon GmbH, SOLVing3D GmbH, LASE industrielle Lasertechnik GmbH, Aicon 3D Systems GmbH, Axios 3D Services GmbH, Dr. Clauß Bild- und Datentechnik GmbH, Lupos 3D GbR, PHOCAD GmbH und das Forschungsnetz Bildsensoren und Bildanalyse. Bei belegten Brötchen war genügend Zeit für intensive Diskussionen und Gespräche zwischen Anwendern und Herstellern.

Nach dem Mittag fand das erste Ausstellertreffen statt, auf dem aktuelle Trends und Ent-

wicklungen der Hersteller präsentiert wurden. Es waren die Firmen Dr. Clauß Bild- und Datentechnik, Topcon, Milan Geoservice, Leica Geosystems und Hexagon Metrology vertreten. Parallel fand die Session Kalibrierung und Genauigkeit statt. Den Anfang machte LARS KRÜGER von der Daimler AG. Er stellte empirische Verfahren zur Überprüfung der relativen Orientierung von Stereokamerasystemen auf Fahrzeugen vor. Eine Sensitivitätsanalyse kann Aussagen über Ausreißer liefern, da die Beobachtungen aus dem Fahrzeug online genutzt werden sollen und von groben Fehlern befreit werden müssen. Der folgende Vortrag von STEFFEN ABRAHAM (Robert Bosch GmbH) war ebenfalls in der Automobilindustrie angesiedelt. In modernen Fahrzeugen werden zunehmend Kameras für die Fahrerassistenz und Fahrerinformation eingebaut. Die Industrie sucht an dieser Stelle robuste Kalibrierverfahren, z. B. für die Anpassung der eingebauten Rückfahr-Kameras. Die Rechenverfahren müssen mit begrenzter Rechenanforderung echtzeitfähig und praxisgerecht einsetzbar sein. Anschließend kam LARS KRÜGER (Daimler AG) zu seinem zweiten Vortrag, in dem es um die Kalibrierung der im Fahrzeug eingesetzten Stereokameras und Laserscannersysteme ging. Es wurden einfache Verfahren zur Überprüfung und Evaluierung von Kalibrierungen mittels Testtafeln vorgestellt. Eine Kalibrierung ohne Korrektur des Bayer-Pattern liefert 50% schlechtere Ergebnisse. Zukünftig sollen u.a. auch Ground Truth Daten aus dem fahrenden Fahrzeug erzeugt werden. Den Abschluss der Sitzung bildete MARKO NEUKAMM (PTB Braunschweig). Er zeigte, wie in der Computer-Tomographie (CT) mit

Hilfe eines Prüfkörpers und einer angepassten Bündelausgleichung, die den Abstand der Bildgeraden minimiert, die geometrischen Eigenschaften der CT exakt beurteilt werden können. Zukünftig sollen im Bereich der CT neue Rekonstruktionsverfahren unter Berücksichtigung der exakten Abbildungsgeometrie entwickelt werden.

Nach Kaffee und Kuchen ging es in die letzten Sessions des Tages. Im Themenblock Laserscanning stand die öffentliche Sitzung des Arbeitskreises „Prüfung und Kalibrierung von Terrestrischen Laserscannern“, geleitet von RUDOLF STAIGER (Hochschule Bochum) auf dem Programm. Hier wurde nach dem Bericht von FREDIE KERN zum aktuellen Stand des universellen Punktwolkenformats OSF rege zwischen Anwendern und Herstellern diskutiert, wie sich geeignete Prüfverfahren für terrestrische Laserscanner definieren, umsetzen und anwenden lassen. Als Ergebnis wurde festgehalten, einen Ringtausch zum Prüfen von TLS an zwei Hochschulen bis Mitte 2011 stattfinden zu lassen. Ansprechpartner hierzu ist FREDIE KERN von der FH Mainz. Parallel zu dieser Sitzung stellten Studierende der Jade Hochschule Ergebnisse einiger ausgewählter Studienprojekte vor. Am Abend fanden sich die Tagungsteilnehmer zum traditionellen Grünkohlessen in der Weser-Ems-Halle ein. Für die sehr kurzweilige Unterhaltung sorgten drei Ladies von Sweet Sugar Swing aus Oldenburg mit ihrem Swing Hits, Boogie Woogie und Rockabilly.

Am nächsten Morgen ging es pünktlich um 9:00 Uhr mit den nächsten Sitzungen weiter. Im Bereich Laserscanning wurden fünf Anwendungsbeispiele gegeben. NATALIE SCHMIDT



Eindruck von der Firmen-Ausstellung und Swing Hits, Boogie Woogie, Rockabilly von Sweet Sugar Swing aus Oldenburg in der Weser-Ems-Halle. (Fotos: PIET MEYER, IAPG Oldenburg).

vom i3Mainz machte den Anfang mit der Vorstellung eines webbasierten Informationssystems chinesischer Sutren-Texte, die mit einem Streifenprojektionsscanner erfasst und über Matching mit Referenztexten diesen automatisch zugeordnet werden konnten. JOST-MICHAEL BROSER (FH Köln) zeigte am Beispiel einer Hellenistischen Höhensiedlung in Albanien die Datenerfassung und -auswertung durch terrestrisches Laserscanning im archäologischen Kontext. Als dritter Vortragender berichtete MARCEL FUSS (Hochschule Bochum) über seine Abschlussarbeit, in der er eine Erfassung unterirdischer Schachtanlagen durch Laserscanning entwickelte, ohne diese selbst betreten zu müssen. Dabei wird der Scanner über Kopf an einem Pendelstativ in den Schacht eingeführt. Anwendungsbeispiel Nummer vier wurde von OLAF GREWE (Fraunhofer IPA) gegeben. Er nutzte einen terrestrischen Laserscanner für die Erfassung einer Werft. Auf der Basis dieser Daten erfolgte dann eine Reorganisation des Fertigungslayouts. Schließlich zeigte KARL ZIPPELT (Karlsruhe Institute of Technology) eine Möglichkeit zur Generierung von Daten für hydraulische Modelle durch Laserscanning auf.

In der Parallelsession ging es um Kameras und Kalibrierung. HEIDI HASTEDT (Jade Hochschule) eröffnete den Tag mit der Untersuchung der Fujifilm Real 3D Wi Stereokamera, die hinsichtlich ihrer geometrischen Stabilität getestet wurde. Es ergab sich, dass mit Vorabkalibrierung Rekonstruktionsgenauigkeiten im Bereich $SX=SY=2\text{ mm}$ und $SZ=10\text{ mm}$ erreichbar sind. Für eine Rekonstruktion mit Simultankalibrierung können Genauigkeiten von $SX=SY=0.8\text{ mm}$ und $SZ=5\text{ mm}$ erreicht werden. Untersuchungen zur Synchronität sollen zukünftig noch detaillierter durchgeführt werden. ANDREAS VOIGT, ebenfalls von der Jade Hochschule zeigte anschließend Untersuchungen zur Genauigkeit von GPS Kameras. Gängige GPS Kameras und ein iPHONE 4 wurden hinsichtlich der Genauigkeit der integrierten GPS Empfänger und Magnetsensoren untersucht. Für die Anwendung „Planung von Photovoltaikanlagen“ sind die Kameras mit Abweichungen in der Richtungsangabe von $>10^\circ$ nur bedingt geeignet. Die festgestellten Abweichungen in der Positionsbestimmung sind hingegen hinreichend genau.

PETER KÖLLER (PCO AG) präsentierte moderne CMOS Bildsensoren für wissenschaftliche und messtechnische Kamera-Anwendungen. Dabei wurde u.a. die neue 5.5 Megapixel Kamera der Firma PCO vorgestellt, die mit sCMOS (scientificCMOS)-Technologie Bildsequenzen mit hoher geometrischer und zeitlicher Auflösung liefern kann. Weiterhin zeichnet sich der rauscharme Sensor durch einen hohen Dynamikbereich aus. Die Kamera verfügt über wählbare Bildauflösungen, z. B. 2560×2160 mit 100 fps oder 320×240 mit max. 900 fps. Zuletzt stellte ROLAND CLAUSS (Dr. Clauß Bild- und Datentechnik GmbH) ein universelles Kamerakalibriersystem mit zentraler Zielmarke vor. Ein Kalibrierverfahren, bei dem die Abbildungsgeometrie der Kamera über das hoch auflösende Winkelmesssystem eines motorisierten Schwenk-Neigekopfes berechnet wird. Allerdings hat das Verfahren aus photogrammetrischer Sicht seine Schwächen, da die Kamerakonstante nicht rechnerisch, sondern nur experimentell auf dem Kreuzschlitten festgelegt wird.

Nach der ausführlichen Mittagspause fand das zweite Ausstellerforum statt, in dem sich die Firmen Automated Precision Europe, Riegl LMS, geo-konzept und CPA Systems präsentierten. Parallel dazu lief eine Sitzung mit dem Thema „Oberfläche und Farbe“. Zunächst präsentierte DIRK RIEKE-ZAPP (Universität Bern) ein photogrammetrisches Verfahren zur Ermittlung der Festgesteinerosion im Gelände. Innerhalb einer Murgangrinne wurde eine Methode zur Quantifizierung von Festgesteinerosion im Gelände basierend auf optischer Messtechnik entwickelt. Zum Einsatz kam die Kamera Alpa 12 metric, 45 mm mit 56 Megapixel Sensor Leaf Aput II-10. Die feldtaugliche Lösung bestand in der photogrammetrischen Aufnahme und Auswertung, die mit einer Wiederholgenauigkeit von $(\sigma_Z) < 0.1\text{ mm}$ durchgeführt wurde und die Erfassung einer Fläche von $2 \times 2\text{ m}^2$ mit Submillimeter Auflösung ermöglichte. BASTIAN HARENDRT (Friedrich-Schiller-Universität Jena) befasste sich mit der Objektivierung von Farbdaten in der 3D-Vermessung. Das Problem der spiegelnden Reflexionen wurde durch die Beleuchtung des Objektes mit linear polarisiertem Licht gelöst. Diffuse Reflexionen können weiterhin durch Berücksichtigung der Be-

leuchtungsrichtung korrigiert werden. Als Ergebnis können dann Objektansichten mit synthetischer Beleuchtung generiert werden. PETER KÜHMSTEDT zeigte die Entwicklung eines handgeführten 3D-Farbscanners. Auf der Basis eines Miniprojektors und zwei Kameras wurde ein transportabler, handgeführter 3D-Scanner vorgestellt. Hiermit können dreidimensionale Objekte auf flexible Weise erfasst werden. Das Gerät transferiert und rechnet die Objektdaten auf einem angeschlossenen Notebook. Die Nutzerschnittstelle wurde auf einem iPod Touch realisiert. Abschließend erläuterte ULRICH CLAUSS (Dr. Clauß Bild- und Datentechnik GmbH) die laserphotogrammetrische Objektaufnahme. Es wurde ein Gerät vorgestellt, das aus einer Digitalkamera mit in der optischen Achse integriertem Laserentfernungsmesser besteht. Über einen motorisierten Schwenkneigekopf kann in dem digital erfassten Bild der Szene nutzergesteuert zu jedem gewünschten Objektpunkt die Entfernung gemessen werden. Die dreidimensionale Modellierung erfolgt am Notebook, von dem aus die zusätzlichen Entfernungsmessungen über den Laserentfernungsmesser gesteuert und zugeordnet werden.

Die letzte Session der Veranstaltung war überschrieben mit dem Thema Mobile Mapping. DANIEL WUJANZ (TU Berlin) untersuchte den Microsoft® Kinect Sensor auf sein Potenzial. Er kann für einfache Messaufgaben eingesetzt werden und eignet sich auch für die Erfassung einfacher dynamischer Probleme. STEPHAN NESER (Hochschule Darmstadt) berichtete über Chancen und Herausforderungen von ToF-Kameras mit abgesetzten Lichtquellen. Er zeigte, dass PMD-Sensoren mit abgesetzten Lichtquellen die Aufnahme von Szenen mit glänzenden, bzw. metallischen Oberflächen erheblich erleichtern. Für eine Lichtquelle können die Entfernungsdaten rechnerisch korrigiert werden. Zukünftig sollen z. B. bei multiplen Lichtquellen die Szenengeometrie und die Reflektionseigenschaften des Objektes in die Korrektur einbezogen werden. HEINZ-JÜRGEN PRZYBILLA (Hochschule Bochum) gab eine Übersicht über UAV-Systeme „MikroKopter“. Die Einsatzmöglichkeiten von unbemannten Minihubschraubern erweitern sich ständig. Aktuelle Plattformen sind durch GPS und Kompass auf autonomes Flie-

gen ausgelegt und ermöglichen eine planbare bildhafte Erfassung von Objekten und Räumen durch Senkrecht- und Schrägaufnahmen. Start- und LandeprozEDUREN können derzeit noch nicht autonom ausgeführt werden und erfordern Erfahrungen in der Steuerung von Modellflugsystemen. Im letzten Vortrag zeigte FRANK NEITZEL (TU Berlin) mobile 3D Mapping mit einem low-cost UAV-System. Eindrucksvoll wurde gezeigt, wie mit einem preisgünstigen UAV flächenhaft Bilder aus der Luft aufgenommen und mit geeigneter frei verfügbarer Software sowohl die Bündelausgleichung als auch die flächenhafte 3D-Objektrekonstruktion durchgeführt werden kann.

Insgesamt handelte es sich bei den Vorträgen mit ganz wenigen Ausnahmen um sehr aktuelle und anspruchsvolle Beiträge, die sich am aktuellen Stand der Technik orientierten und viele neue Impulse für eigene und weitere wissenschaftliche Untersuchungen geben konnten. Einigen Autoren wäre allerdings zu raten, ihr neues Verfahren oder Produkt nicht durch das klischeehafte Auflisten von möglichen Nachteilen der etablierten Verfahren zu motivieren, sondern durch belastbare Genauigkeitsangaben, welche eine objektive Einschätzung des Potenzials der vorgestellten Produkte ermöglichen.

Alle Vortragsfolien sind auf der Homepage der Veranstaltung unter www.jade-hs.de/fachbereiche/bauwesen-und-geoinformation/abteilung-geoinformation/oldenburger-3d-tage/programm-2011-vortragsfolien/ zum Download als PDF erhältlich. Im April erscheint der diesjährige Tagungsband mit den schriftlichen Beiträgen im Wichmann Verlag. Die insgesamt 213 Gäste, die in diesem Jahr fast zur Hälfte aus dem Bereich der Hochschulen kamen, haben sich wieder rundum wohl und gut versorgt gefühlt, was wohl auch den Zahlen von verzehrten 18,5 kg Keksen und 26 kg Obst zu entnehmen ist. Abschließend bietet sich hier die Möglichkeit, THOMAS LUHMANN und CHRISTINA MÜLLER für die wieder einmal gelungene Veranstaltung zu danken und auf die 11. Oldenburger 3D-Tage am 1. und 2. Februar 2012 hinzuweisen.

MAREN LINDSTAEDT, Hamburg und
MANFRED WIGGENHAGEN, Hannover

Fachtagung Mobile Mapping 2011 am 16. Februar 2011 in MuttENZ, Schweiz

Das Institut Vermessung und Geoinformation der Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik (Fachhochschule Nordwestschweiz – FHNW) veranstaltete am 16. Februar 2011 die Fachtagung *Mobile Mapping 2011* (MM2011) in MuttENZ, Schweiz. Die Zusammenstellung des Vortragsprogrammes und die Organisation der Fachtagung lag in den Händen von Prof. Dr. STEPHAN NEBIKER (FHNW MuttENZ). Unterstützt wurde die Veranstaltung von der Schweizerischen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, von der DGPF, vertreten durch die Arbeitskreise Sensoren und Plattformen sowie Optische 3D-Mess-technik, durch den Schweizerischen Ingenieur- und Architekten-Verein (Sektion Basel) sowie durch Swiss Engineering (Fachgruppe Vermessung und Geoinformation). Die MM2011 war die erste Konferenz im deutschsprachigen Raum, die sich ausschließlich der Thematik *Mobile Mapping* in all ihren Ausprägungen widmete. Die Fachtagung richtete sich an ein breites Fachpublikum aus Geomatik, Bauingenieur- und Gemeindeingenieurwesen mit einem Interesse an Mobile Mapping

Systemen sowie an deren Anwendungsmöglichkeiten und -potential. Die 140 Teilnehmer der Veranstaltung waren erfreulicherweise überwiegend Interessierte aus dem Anwenderbereich, aus Hochschulen und von Systemherstellern, so dass ein interessantes Forum für Diskussionen zwischen Anwendern, Herstellern und Hochschulangehörigen geboten werden konnte. In einer attraktiven und gut dotierten Ausstellung begleitend zur Fachtagung nutzten acht Aussteller (Hersteller, Betreiber und Hochschulen) die Gelegenheit, ihre Systeme und Entwicklungen vorzustellen.

In vier Sitzungen zu den Themenbereichen Einführung & Grundlagen, Plattformen & Systeme, Anwendungen und Untersuchungen & Forschungsthemen wurden insgesamt 15 Vorträge gehalten. Nach einer kurzen Begrüßung durch Prof. S. NEBIKER und Prof. B. SPÄNI (Direktor der Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik in der FHNW) führte Dr. R. REINAUER (Tiefbauamt Basel-Stadt) aus Sicht eines Anwenders bzw. Datennutzers in die Thematik ein, indem er in seinem Geschäftsmodell Infrastruktur Straßenraum feststellte, dass Daten Geld kosten dürfen, da sie an anderer Stelle Einsparungen gerade bei der Erhaltung der Infrastruktur bewirken. Dr. M. CRAMER (Universität Stuttgart) erklärte in seiner Präsentation über Anmerkungen zur



Begrüßung der Teilnehmer der Fachtagung Mobile Mapping 2011 an der FHNW MuttENZ durch Prof. S. NEBIKER.

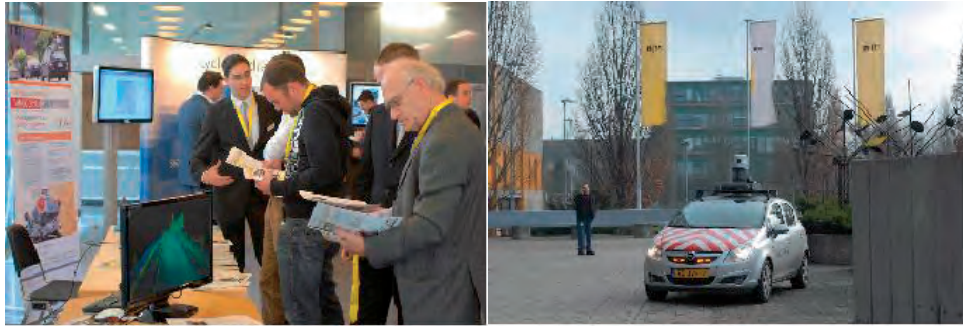
Georeferenzierung mobil erfasster Daten wichtige mathematische Grundlagen, während Prof. NEBIKER eine Übersicht über die vorhandene Messsensorik (Kameras, Laserscanner und Radar) präsentierte. Dr. G. GRÄFE (3D-Mapping Solutions GmbH, Oberhaching) zeigte an Beispielen aus der Ingenieurvermessung und dem 3D-Kataster auf, welche Parameter für mobile Mapping-Fahrzeuge wichtig sind, welche Genauigkeitsstufen es gibt und wie wichtig die Sensor- bzw. Systemkalibrierung für die Datenerfassung ist.

In der zweiten Sitzung wurden hauptsächlich verschiedene Systeme und Trägerplattformen an Projektbeispielen präsentiert. Dr. J. LINDENBERGER (TopScan GmbH, Rheine) stellte das firmeneigene Fahrzeug für mobiles Laserscanning (Optech Lynx Mobile Mapper) für die Bestandsaufnahme im Straßenwesen anhand von Projekten in der Schweiz vor. J. BURKHARD (FHNW Muttentz) präsentierte das Mobile Mapping Fahrzeug der FHNW, das auf einem Stereovision-System basiert und u.a. Punktwolken durch so genanntes „dense matching“ in den Bildsequenzen erstellt. In einer Genauigkeitsstudie über Mobile Mapping von Autobahnen und Straßen in der Schweiz zeigte B. HAEBLER (Helimap System AG, Zürich) anhand von fünf Projekten mit einem handgehaltenen Laserscanningsystem (inkl. Kamera) in einem Hubschrauber, dass eine Punktgenauigkeit von 1-3 cm möglich ist. Das Aufnahmesystem fliegt ca. 100 m über dem Boden mit einer Geschwindigkeit von ca. 10 m/s und durch die Kombination mit der Photogrammetrie können Orthophotos mit 2 cm GSD generiert werden. S. RICKENBACHER (terra vermessungen ag, Zürich) stellte ein modulares mobiles Sensorsystem vor, das auf unterschiedlichen Trägerplattformen (für die Straße, auf der Schiene, auf dem Wasser und auf Handwagen) eingesetzt werden kann. Im Mittelpunkt stand dabei als Eigenentwicklung ein Messzug, der mit vielen verschiedenen Sensoren (Laserscanner, Panoramakameras, Geo-Radar) Bestandsdaten für das Schienennetz in Kasachstan mit 120 km/h aufnehmen soll. Prof. Th. KERSTEN zeigte anschließend, wie man in einem schiffsbasierten Multi-Sensorsystem einen terrestrischen Laserscanner integrieren kann und welches Genauigkeitspotential in dem System für Anwendungen im

Hamburger Hafen steckt, wenn eine genaue Systemkalibrierung zur Beseitigung systematischer Effekte durchgeführt wird.

In der dritten Sitzung „Anwendungen“ zeigten die Referenten, wie man mobil erfasste Daten in verschiedenen Projekten einsetzen kann. F. SCHMIDT (Tiefbauamt, Basel-Stadt) machte deutlich, wie wichtig die Aktualität mobil erfasster 3D-Bestandsdaten gerade bei immer kürzeren Bearbeitungszeiten verschiedener Bauprojekte im Straßenbereich sind. Durch entsprechende GeoViewer können bereits kombinierte Punktwolken aus der Luft und von Fahrzeugen erfasst und in einer Datenbank abgelegt die Bedürfnisse vieler Anwender abdecken, wenn man z. B. pixelweise die Höhen anzeigen kann oder eigene Messungen vornehmen kann. Welche Bedeutung mobil erfasste Straßendaten für die Zustandsanalyse und -bewertung hinsichtlich Sicherheitsaspekte (z. B. Wasserablauf) haben können, zeigte Prof. A. GROSSMANN (Lehmann und Partner GmbH, Erfurt). Die Bestandserfassung erfolgt vornehmlich durch bildbasierte Systeme, mit denen auch Risse von 1 mm im Straßenbelag detektiert werden müssen. Mit sphärischen Panoramabildern (Cycloramas), von einem Fahrzeug aus durch je eine nach vorn und hinten ausgerichtete Kamera mit Fischaugenobjektiv aufgenommen, liefert das System CycloMedia, das Dr. B. BEERS (CycloMedia Technology B.V., Waardenburg, Niederlande) vorstellte, photogrammetrisch korrekte Bilddaten, die für Bilddatenbanken und für punktbasierte Datenerfassungen mit einer absoluten Genauigkeit von 10 cm genutzt werden. H. EUGSTER (iNovitas AG, Muttentz) präsentierte das bildbasierte Stereovision-System der FHNW im praktischen Einsatz für die automatische Erfassung von Verkehrsschildern (> 80% Erfolgsrate) und für einen möglichen Einsatz als 3DCityTV-Service.

In der letzten Sitzung wurde durch Prof. N. HAALA der Qualitätsaspekt (Geometrie und Vollständigkeit) anhand von 3D-Stadtmodellen für die so genannten MLS-Daten angesprochen. Dabei stellt sich schon die Frage, welche Daten eigentlich welche Daten kontrollieren. Außerdem konnte er zeigen, welche Genauigkeiten bei guten und schlechten GNSS-Empfangsbedingungen in innerstädtischen Bereichen für mobile Erfassungssysteme



Impressionen von der Firmenausstellung zur Fachtagung Mobile Mapping 2011 an der FHNW Muenzen.

me zu erwarten sind. Zum Abschluss der Tagung stellte Prof. J. HYYPÄ (Finnish Geodetic Institute, Helsinki) das EuroSDR Mobile Laser Scanning Experiment vor, das durch eine sehr zurückhaltende Beteiligung von Seiten der Hersteller, Anwender und Hochschulen geprägt war. Dabei stellte sich schon die Frage, ob dieses Projekt zu früh durchgeführt wurde, da viele Hersteller und Anwender technologisch scheinbar noch nicht bereit waren.

Obwohl sicherlich einige Aspekte wie Systemintegration und -kalibrierung sowie Automation in der Datenextraktion und -modellierung vielleicht etwas zu kurz kamen, stellte die Fachtagung einen wichtigen Einstieg in diese Thematik im deutschsprachigen Raum dar, um u.a. das Potential dieser sich rasant entwickelnden Technologie einem breiten Publikum aufzeigen zu können. Dem FHNW-Team um Prof. NEBIKER gilt besonderer Dank für die hervorragende Organisation und Durchführung dieser Veranstaltung. Die Vorträge stehen im Internet unter dem folgenden Link www.3dgi.ch/mm2011 für Interessierte zur Verfügung.

THOMAS KERSTEN, Hamburg

ISPRS Workshop 3D-ARCH 2011 vom 2.–4. März 2011 in Trient, Italien

From March 2nd to 4th 2011, the 4th 3D-ARCH international workshop on “3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex

Architectures” was held in Trento, Italy. The workshop was jointly organized by the 3D Optical Metrology (3DOM) unit of the Fondazione Bruno Kessler (FBK) Italy and the Department of Architecture, Carleton University, Canada. The conference chairs were FABIO REMONDINO (FBK) and SABRY EL-HAKIM (Carleton University). The event was the fourth in a series, following the events in Venice 2005, Zurich 2007, and Trento 2009. The workshop was sponsored by Leica and ShapeQuest, supported by ISPRS, and CIPA and held as an event of the ISPRS Working Group V/4 “Image-based and range-based 3D modeling”.

The workshop had 132 participants from 22 different nations. It featured 92 articles, which were selected from 108 submitted abstracts. All accepted articles are published in the International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-5/W16.

The workshop was organized in 16 technical sessions, some of them in parallel, with topics like “Range-based 3D modeling”, “Image-based 3D modeling”, “3D modeling with integrated techniques”, “Sensors, algorithms and comparisons”, “3D for Virtual Museums, Conservation and Communication”, and “Digital heritage sites”. 15 papers were presented in two poster sessions, 77 papers in the oral sessions. Three special sessions were organized and devoted to “Automated orientation of image sequences”, “Procedural modeling” and “Interactive online 3D models”.

Each of the three workshop days started with a keynote talk. The first day was introduced by THOMAS KERSTEN (HafenCity Uni-

versity Hamburg, Germany). He gave his keynote on "Beyond automation – Precise and detailed 3D modeling using photogrammetry and terrestrial laser scanning". The talk gave a great overview of the status, problems and efforts in 3D modeling applications. The second day started with JEAN-PHILIPPE PONS (ACUT-E3D, France) with a talk on "High-resolution large-scale multi-view stereo". The keynote presented his latest developments in automated image matching with excellent results from terrestrial and low-altitude images. The third day started with LIVIO DE LUCA (MAP-Gamsau CNRS, Marseille, France) with a talk on "A semantic based approach for the digital analysis of architectural heritage". The presentation described the segmentation and semantic annotations of reality-based 3D models for architectural and archaeological applications.

The workshop conclusions highlighted the mandatory sensor and data integration for

large and complex site recording and 3D modeling but a lack of powerful and reliable software for the processing and fluent visualization of large data sets. The incompatibility of software systems, file formats, and appropriate knowledge in the 3D domain was noted, leading to data being lost in transfer or difficulties in handling 3D models by non-experts. On the positive side, the workshop showed the great interest in the topic of 3D modeling from many different disciplines such as architecture, archeology, mining, cultural heritage, virtual reality, etc. The presence of many young researchers and participants raises the hope that many of the aforementioned problems will be addressed and solved in the near future.

The social program included a visit of the Buonconsiglio castle in Trento and on March 5th many participants joined the organized skiing-day.

ALESSANDRO RIZZI, Trient, Italien

Mitteilungen

TU München bescheinigt Äquivalenz mit Master und verleiht wieder erste Diplomingenieur-Urkunden

Die Technische Universität München (TUM) ermöglicht den Absolventen ihrer Ingenieurstudiengänge, auch weiterhin von dem international anerkannten Markenzeichen „Dipl.-Ing.“ zu profitieren. Auf den Abschlussurkunden bescheinigt die TUM, dass der akademische Grad Master of Science dem akademischen Grad des Diplom-Ingenieurs entspricht, der für die Qualität der deutschen Ingenieurausbildung steht. Am 4. Februar 2011 überreichte TUM-Präsident WOLFGANG A. HERRMANN die ersten dieser Urkunden an die Absolventen. Sie gestatten ihnen, wahlweise den M.Sc. oder den Dipl.-Ing. (TUM) zu führen.

Seit mehr als 100 Jahren genießen in Deutschland ausgebildete Ingenieure weltweit höchste Anerkennung. Der nur im deutsch-

sprachigen Raum verliehene Titel Diplom-Ingenieur ist für viele Absolventen ein Trumpf. Die TU München hat deshalb seit jeher gefordert, den „Dipl.-Ing.“ auch im zweistufigen Ausbildungssystem zu erhalten. „Kein Unternehmen würde daran denken, seine bewährte Marke aufzugeben, nur weil es ein neues Modell auflegt“, sagt TUM-Präsident WOLFGANG A. HERRMANN. „Es wäre töricht, diesen Wettbewerbsvorteil nicht mehr auszuspielen, gerade im Zeitalter der rasanten Globalisierung.“

Für ihre Absolventen der Ingenieurwissenschaften hat die TUM eine Option geschaffen, das ihnen diesen Vorteil weiter ermöglicht: Unter der Voraussetzung, dass das Studium einem früheren Diplomstudium entspricht, verleiht die TUM auf ihren Urkunden „den akademischen Grad Master of Science (M.Sc.) äquivalent mit dem akademischen Grad Diplom-Ingenieur (TUM)“. „Wer unsere Universität nach einem Vollstudium als Ingenieur verlässt, kann so weiterhin den Dipl.-Ing. angeben“, sagt HERRMANN. Der TUM-Präsident



Studiendekan Prof. UWE STILLA mit den ersten TUM-Absolventen des Masterstudienganges Geodäsie und Geoinformation, die äquivalent zum „M.Sc.“ den Titel „Dipl.-Ing. (TUM)“ tragen dürfen (Foto: ULI BENZ, TU München).

überreichte die ersten Urkunden persönlich an Absolventen der Studiengänge Geodäsie und Geoinformation, Bauingenieurwesen, Maschinenbau sowie Lebensmitteltechnologie. Dass gleich fünf der ersten acht Urkunden an

Absolventen/-innen der Geodäsie und Geoinformation überreicht wurden, freut besonders den TUM-Studiendekan der Geodäsie und Geoinformation (G&G), Prof. UWE STILLA.

Hochschulnachrichten

Technische Universität Wien

Herr Dipl.-Ing. VAHID NAEIMI promovierte am 16.3.2009 am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien mit der Arbeit „*Model improvements and error characterization for global ERS and METOP scatterometer soil moisture data*“ zum Dr. techn.

1. Gutachter: Prof. Dr. WOLFGANG WAGNER, TU Wien, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung; 2. Gutachter: Prof. Dr. RALF LUDWIG, Ludwig-Maximilians-Universität München, Abteilung für Geographie

Kurzfassung:

Bodenfeuchte ist eine wichtige Variable im hydrologischen Zyklus. Die Verbindung zwischen Energie- und Wasserhaushalt ist durch den Feuchtigkeits- und Temperaturzustand

des Bodens an der Bodenoberfläche und Atmosphäre gegeben. Die Entwicklung von Bodenfeuchtedaten ist wichtig für die numerische Wettervorhersage und Klima-Modellierung. Die Kenntnis über die Verteilung der Bodenfeuchte ist essentiell für die Vorhersage des gegenseitigen Einflusses von Prozessen an der Bodenoberfläche (wie z. B. Evaporation, Infiltration und Abfluss) auf Wetter und Klima. Aufgrund der hohen Variabilität der Bodenfeuchte in Raum und Zeit, ist eine gute Raum-Zeit-Darstellung der Bodenfeuchte recht anspruchsvoll. In-situ Beobachtungsverfahren der Bodenfeuchte sind hinreichend genau, aber recht kostspielig. Ein weiteres Problem mit in-situ Messungen im Feld ist die Tatsache, dass diese in der Regel Punktmessungen sind und nur eine kleine Maßstabsskala abdecken. Aufgrund der engen Verbindung zwischen Wasser und den dielektrischen Ei-

enschaften des Bodens haben Mikrowellen-Fernerkundungsmethoden das Potenzial, die Grenzen der traditionellen Methoden zu überwinden, und darüber hinaus flächenhafte Messungen mit globaler Abdeckung und häufigeren Beobachtungen anzubieten. Gleichbedeutend mit einer Verbesserung der Instrumente und Fernerkundungstechniken sind die geophysikalischen Methoden, die verwendet werden, um die Dynamik der Bodenfeuchte aus den gemessenen Mikrowellensignalen zu extrahieren. Die Scatterometer an Bord der Europäischen Fernerkundungssatelliten ERS und MetOp haben sich als nützlich für die Überwachung der Bodenfeuchte erwiesen. Das Ziel dieser Dissertation war die Entwicklung eines verbesserten Algorithmus zur Ableitung von Bodenfeuchte, basierend auf der so genannten „TU-Wien Change Detection“ Methode mit einer neuen Parametrierung und Fehleranalyse. Der neue Algorithmus, WARP5 („Water Retrieval Package“), führt zu einem robusteren und räumlich einheitlicheren Bodenfeuchteprodukt mit einer höheren Auflösung als mit der früheren Methode (WARP4).

Eine Gegenüberstellung von WARP4 und WARP5 Datensätzen mit Feldbeobachtungen und mit modellierten Bodenfeuchtedaten zeigt, dass der neue Algorithmus über eine bessere Leistung verfügt und Fehler in bestimmten Bereichen wirksam korrigiert. Parallel zur Ableitung der Bodenfeuchte wurde eine umfassende Fehleranalyse durchgeführt. Diese Fehleranalyse besteht aus einer Kombination von analytischer Fehlerfortpflanzung und einer numerischen Lösung auf Basis einer Monte-Carlo-Simulation. Das Verständnis von Fehlern und deren Abschätzung in jedem Verarbeitungsschritt der Methode stellt einen wertvollen Beitrag für die optimale Bestimmung der Bodenfeuchte und auch für wissenschaftliche Anwendungen, insbesondere für die Datenassimilation, dar.

Technische Universität Wien

Herr Dipl.-Geogr. CARSTEN PATHE promovierte am 16.3.2009 am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien mit der Arbeit „Surface Soil

Moisture Retrieval Using Envisat ASAR Global Mode Data“ zum Dr. rer. nat.

1. Gutachter: Prof. Dr. WOLFGANG WAGNER, TU Wien, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung; 2. Gutachter: Prof. Dr. VOLKER HOCHSCHILD, Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Institut für Geographie

Kurzfassung:

Bodenfeuchte als wichtige Größe in den globalen Kreisläufen von Wasser, Energie und Kohlenstoff, ist räumlich und zeitlich hoch variabel. Mit Hilfe von in-situ-Messungen kann die Bodenfeuchte sehr genau bestimmt werden. Allerdings kann sie auf diese Weise aufgrund organisatorischer und finanzieller Gründe nicht auf kontinentaler bis hin zur globaler Ebene gemessen werden. Hierfür können alternativ Radarfernerkundungsmethoden genutzt werden, die Daten auf unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Skalen zur Verfügung stellen. Prinzipiell kann die Radarrückstreuung mit Hilfe der Maxwell-Gleichungen beschrieben werden, um so Bodenfeuchte aus den Radarsignalen zu extrahieren. Aufgrund der Komplexität natürlicher Oberflächen ist dies aber kaum durchführbar. Daher stehen nur Näherungslösungen zur Verfügung, die eng mit den ihnen zugrundeliegenden Gültigkeitsbedingungen verknüpft sind. Die Anwendbarkeit theoretischer Modelle zur Modellierung der Rückstreuung von unbedeckten Bodenoberflächen und Vegetationsbeständen wurde in zahlreichen Studien kritisch hinterfragt, die keine zufriedenstellenden Übereinstimmungen zwischen modellierten und gemessenen Bodenfeuchtwerten finden konnten. Mit Hilfe sogenannter Change-Detection-Methoden wird versucht, diese Probleme zu umgehen, indem lediglich die Änderungen in der Radarrückstreuung über die Zeit ohne Beschreibung der absoluten Rückstreuung beobachtet wird.

WAGNER et al. (1999) entwickelten ein Change-Detection-Modell für C-Band-Scatterometerdaten. Dabei wird die Radarrückstreuung mit Hilfe empirischer Rückstreuparameter zur Ableitung relativer Bodenfeuchtwerte modelliert. Die empirischen Rückstreuparameter beschreiben die Variation der Rückstreuwerte über die Zeit zwischen einem Niedrigstwert typisch für trockene Boden-

feuchtebedingungen und einem Höchstwert typisch für gesättigte Bodenfeuchtebedingungen. Drei unabhängige Radarrückstreumessungen pro Aufnahmezeitpunkt unter verschiedenen Einfallswinkeln stehen im Fall des ERS Scatterometers zur Verfügung und werden zur Modellierung saisonaler Rückstreueffekte benutzt, welche auf dem radartypischen Einfallswinkelverhalten basieren. Das invertierte Rückstreumodell kann dann benutzt werden, um einzelne Radarmessungen zwischen Trockenbedingungen (0%) und Feuchtebedingungen (100%) zu skalieren.

Im Fall des Envisat ASAR steht lediglich nur eine Radarrückstreumessung bei einem Einfallswinkel zur Verfügung. Daher kann der Bodenfeuchtealgorithmus, der saisonale Änderungen in den Radardaten berücksichtigt, nicht direkt vom ERS-Scatterometer auf die ASAR GM Daten übertragen werden. Die Datenanalyse hat gezeigt, dass Änderungen in der Radarrückstreuung im Zusammenhang mit der zeitlichen Änderung der Vegetation im Allgemeinen schwächer ausgeprägt sind als die durch Bodenfeuchteänderungen hervorgerufenen Signaländerungen. Da außerdem die ASAR GM Daten in HH-Polarisation vorliegen, wird Vegetation von den Radarsignalen besser durchdrungen als im Fall des in VV-Polarisation arbeitenden ERS Scatterometers. Daher wird zur Vereinfachung angenommen, dass die Parameter des Rückstreumodells zeitlich konstant sind und saisonale Effekte durch Änderungen der Vegetation vernachlässigt werden können. Mit Hilfe des angepassten Rückstreumodells werden ebenfalls Radareinzelmessungen zwischen den Referenzwerten für trockene und gesättigte Bodenfeuchtebedingungen skaliert.

Die Ergebnisse wurden mit Hilfe von in-situ Bodenfeuchtemessungen des Oklahoma Mesonets und Bodenfeuchtwerten aus ERS Scatterometerdaten validiert. Gute Übereinstimmungen zwischen der relativen oberflächennahen Bodenfeuchte aus ASAR GM-Daten und den Validierungsdaten wurden beobachtet. Beim direkten Vergleich der Ergebnisse zeigt sich, dass die Bodenfeuchte aus ERS-Scatterometerdaten etwas bessere Ergebnisse liefert als der ASAR GM Sensor. Als Hauptfehlerquelle wurde die radiometrische Genauigkeit von 1.2 dB identifiziert. Das ist ein im

Vergleich zum ERS Scatterometer mit einer radiometrischen Genauigkeit von 0.3 dB ein relativ hoher Wert. Trotzdem können aus ASAR GM Daten Bodenfeuchtwerte mit wesentlich mehr räumlichen Details als für den ERS Scatterometer abgeleitet werden, die ebenso die zeitliche Dynamik der Bodenfeuchte abbilden wie im Fall des Scatterometers. Die Validierung hat gezeigt, dass die Vernachlässigung saisonaler Vegetationseffekte auf die Radarrückstreuung eine haltbare Vereinfachung darstellt und das ASAR GM Daten für ein operationelles Bodenfeuchtemonitoring mit Hilfe von Change-Detection-Modellen genutzt werden können.

Technische Universität Wien

Herr Dipl.-Ing. ZOLTAN BARTALIS promovierte am 14.1.2010 am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technische Universität Wien mit der Arbeit „*Spaceborne Scatterometers for Change Detection over Land*“ zum Dr. techn.

1. Gutachter: Prof. Dr. WOLFGANG WAGNER, TU Wien, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung; 2. Gutachter: Prof. Dr. NIKO VERHOEST, Ghent University Faculty of Bioscience Engineering

Kurzfassung:

Untersuchungen der Erdoberfläche mit Scatterometern erlangen in der Mikrowellenfernerkundung einen immer größeren Stellenwert. Vor diesem Hintergrund muss festgestellt werden, dass ein zeitnaher Zugriff auf global verfügbare geophysikalische Parameter wie beispielsweise Bodenfeuchte oder Biomasse unumgänglich und essenziell für hydrologische und klimatologische Studien ist. Ein typisches Beispiel für die Ableitung geophysikalischer Parameter aus orbitgestützten Scatterometerdaten bietet die derzeitige Methodik zur Extraktion von Bodenfeuchteinformationen, die am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.) der Technischen Universität Wien entwickelt wurde. Dabei werden die Bodenfeuchtedaten aus C-Band Scatterometerdaten der European Remote Sensing Satellites ERS-1 und ERS-2 abgeleitet. Durch den an Bord der MetOp-Satellitenfamilie ein-

gebauten Advanced Scatterometer (ASCAT) ist eine operationelle Kontinuität der Methodik gegeben. Zudem liefert der SeaWinds-Scatterometer an Bord des Satelliten QuikSCAT Daten in einem zusätzlichen Wellenlängenbereich (Ku-Band) und einer kontinuierlichen 360° azimuthal orientierten Blickrichtung. Jeder Versuch, aus diesen Sensoren (möglichst globale) geophysikalische Parameter der Landoberflächen abzuleiten, sieht sich aufgrund des spezifischen Rückstreuverhaltens verschiedener Landbedeckungskategorien und Klimate mit einer Reihe von Problemen konfrontiert. Die vorliegende Dissertation verfolgt mehrere Zielsetzungen.

Anfangs wird auf die Grundlagen der Radarfernerkundung im Allgemeinen und auf die der Scatterometrie im Speziellen eingegangen, und das unter besonderer Berücksichtigung des Instrumentendesigns und Funktionalität, der räumlichen und zeitlichen Datenabdeckung, der Datenprozessierung, -kalibrierung und -validierung sowie möglicher Synergien zwischen den ERS-, ASCAT und SeaWinds-Instrumenten. In einem zweiten wichtigen Punkt wird auf den Verbesserungsbedarf zweier derzeitiger Problempunkte bei der Bodenfeuchteableitung eingegangen. Dabei handelt es sich zum einen um die Wahl eines neuen diskreten geodätischen Gitternetzes, um den Anforderungen der ASCAT-Daten im Bodenfeuchteprozessor Rechnung zu tragen. Des Weiteren wird auf die Korrektur von Azimutaleffekten in den Rückstreudaten des Scatterometers zur Verbesserung der Bodenfeuchteableitung in einigen problematischen Gebieten eingegangen. Ein drittes Ziel dieser Arbeit ist die Darlegung des eigentlichen Bodenfeuchtealgorithmus unter Einbeziehung der zuvor genannten Verbesserungsvorschläge und der notwendigen Anpassung des ASCAT-Prozessors für die nahezu in Echtzeit erfolgende Datenverarbeitung. Die vierte und damit letzte Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist die Bewertung der absoluten und relativen Kalibrierung der beiden Instrumentengenerationen (ERS und ASCAT), welche für Bereitstellung langfristiger, einheitlicher und konsistenter Rückstreu- und Bodenfeuchtedatensätze von großer Bedeutung ist.

Technische Universität Wien

Herr Dipl.-Ing. RADEN HARI GINARDI promovierte am 28.10.2010 am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technische Universität Wien mit der Arbeit „*Remote Sensing Data Handling to Improve the System Integration of Indonesian National Spatial Data Infrastructure*“ zum Dr. techn.

1. Gutachter: Prof. Dr. JOSEF JANSKA, TU Wien, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung; 2. Gutachter: Prof. Dr. A MIN TJOA, TU Wien, Institut für Softwaretechnik und Interaktive Systeme

Kurzfassung:

Durch die Verwendung von Metadaten als Referenz für räumliche Abfragen werden Fernerkundungsdaten und andere räumliche Datensätze mit ihrer semantischen Information verbunden. In den gegenwärtigen Katalog-Systemen, wie etwa jenen von Satellitendaten-Anbietern und in den Daten-Vertriebssystemen wird jedes Fernerkundungsbild als unabhängige Einheit gehalten. Es gibt sehr eingeschränkte Möglichkeiten zu erfahren, wie ein Bild mit einem anderen verbunden ist, auch wenn ein Bild aus einem anderen abgeleitet wurde. Für viele Zwecke ist vorteilhaft, wenn eine Verbindung zwischen Fernerkundungsbildern oder anderen räumlichen Daten erhalten oder rekonstruiert werden kann. Diese Forschungsarbeit soll erkunden, wie ein Bild zu dessen Information verknüpft ist und wie es zu anderen Bildern verknüpft werden kann.

Indem die Verbindungen zwischen den Fernerkundungsbildern untersucht werden, kann eine Abfrage in einer Sammlung von Fernerkundungsdaten erweitert werden, zum Beispiel, um die Antwort auf die Frage zu finden: „Welche Bilder wurden verwendet, um einen bestimmten Datensatz zu erzeugen?“, oder „Welche Bilder wurden unter Verwendung eines konkreten Datensatzes generiert?“, oder „Gibt es eine Beziehung zwischen Bild A und Bild B in Bezug auf die durchlaufenen Prozessierungsschritte?“ Indem Verbindungen zwischen den räumlichen Datensätzen innerhalb einer Datensammlung aufgebaut werden, welche die Prozessierungskette zur Grundlage nehmen, entsteht eine weitere Möglichkeit,

die Organisation räumlicher Daten zu unterstützen.

Das Ergebnis der Forschungsarbeiten führt zu einer Verbesserung der Handhabung räumlicher Daten, wobei eine Nachbarschaftsliste geführt wird, um die Verbindung zu existierenden räumlichen Daten aufzubauen.

Die Verbesserung steigert das Potenzial der Abfragen in räumlichen Daten innerhalb eines Katalog-Systems und ermöglicht das Gruppieren oder auch die Klassifizierung der Datensätze, abhängig von der Nutzung der Datensätze. In einem System, welches Entscheidungen unterstützen soll, kann die Aussage über die Nutzung jedes Datensatzes zur Qualitätsbeurteilung herangezogen werden, oder aber sie kann als ein Parameter dienen, mit welchem die Produktivität eines Datensatzes innerhalb einer Datensammlung bewertet werden kann.

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Frau Dipl.-Ing. MIRIAM HOMMEL (geb. REHOR) promovierte am 8.7.2010 an der Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften des Karlsruher Instituts für Technologie mit der Arbeit *„Detektion und Klassifizierung eingestürzter Gebäude nach Katastropheneignissen mittels Bildanalyse“* zum Dr.-Ing.

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. HANS-PETER BÄHR, Karlsruhe; Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. habil. STEFAN HINZ, Karlsruhe; Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. GÜNTHER SCHMITT, Karlsruhe

Kurzfassung:

Katastrophen richten jedes Jahr schwere Schäden an. Nach einem solchen Ereignis herrscht meist Chaos. Gebäude sind eingestürzt und ihre Trümmer versperren oftmals die Straßen, so dass es schwierig ist, einen Überblick über die Schadenslage zu erlangen. Dieser Überblick ist aber unerlässlich, um die für die Rettungseinsätze verfügbaren Ressourcen möglichst effektiv koordinieren zu können. Daher wird eine schnelle und großflächige Schadensanalyse benötigt, die nicht nur feststellt, welche Gebäude eingestürzt sind, sondern auch welche geometrische Schadensform diese auf-

weisen. Ein hierfür geeignetes automatisches Analyseverfahren existierte bislang noch nicht.

In dieser Arbeit wurde ein solches Verfahren zur automatischen Erkennung und Klassifizierung eingestürzter Gebäude nach Katastropheneignissen entwickelt. Dieses unterscheidet nicht nur zwischen eingestürzten und erhaltenen Gebäuden. Es werden vielmehr zehn verschiedene Schadensbilder differenziert (z. B. Gebäudeumsturz, Trümmerkegel), die typische Schadensformen von Gesamtgebäuden nach deren Einsturz beschreiben. Als Grundlage für die Schadensanalyse dienen digitale Oberflächenmodelle (DOM), die aus Daten abgeleitet werden, welche mit einem flugzeuggetragenen Laserscanner erfasst wurden. Flugzeuggetragenes Laserscanning eignet sich besonders für die Erfassung von Daten nach Katastrophen, da damit in kurzer Zeit Höhendaten großer Gebiete erfasst werden können, ohne dass diese betreten werden müssen.

Das Wissen über die Eigenschaften eingestürzter Gebäude sowie ihrer Schadensbilder wurde in einem Modell zusammengefasst, das die Grundlage für die Erkennung und Klassifizierung der Schädigungen darstellt. Das entwickelte Verfahren basiert auf dem Vergleich geometrischer Modelle der Gebäude vor und nach der Katastrophe. Für die Generierung letzterer aus den nach der Katastrophe erfassten Daten wird zunächst eine Segmentierung von Bereichen mit ebener Oberfläche durchgeführt. Diese werden im Rahmen einer anschließenden Dreiecksvermaschung mit den Bereichen verknüpft, in denen die Oberfläche uneben ist. Für die Analyse der strukturellen Veränderungen der Gebäude (Schadensanalyse) werden die geometrischen Beschreibungen der Gebäude vor und nach dem Eintritt der Katastrophe überlagert und ihre Oberflächeneigenschaften miteinander verglichen. Auf diese Weise kann jedes Gebäude in Segmente unterteilt werden. Diese repräsentieren Bereiche, die entweder zu beiden Zeitpunkten eine ebene Oberfläche aufweisen oder zu mindestens einem der beiden Zeitpunkte keine ebene Oberfläche haben. Für diese Segmente werden anschließend charakteristische Merkmale wie die Volumenreduktion oder die Höhendifferenz extrahiert. Des Weiteren werden Merk-

male berechnet, die ein Gebäude als Ganzes beschreiben. Neben diesen Merkmalen, welche die geometrischen Veränderungen der Gebäude beschreiben, werden außerdem Merkmale bestimmt, mit denen multispektrale Information in das Analyseverfahren integriert werden kann, um untersuchen zu können, inwiefern die Erkennung und Klassifizierung eingestürzter Gebäude durch die Berücksichtigung multispektraler Information verbessert werden kann. Mithilfe der Merkmale erfolgt schließlich die Zuordnung der Segmente zu den unterschiedlichen Schadensbildern.

Die Verifizierung des Verfahrens erfolgte durch die Anwendung auf Daten, die für ein Gebiet mit real eingestürzten Gebäuden erfasst wurden. Außerdem wurden zwei Datensätze verwendet, die durch die Simulation einer Laserscannerbefliegung basierend auf CAD-Modellen eingestürzter Gebäude generiert wurden. Des Weiteren umfasste die Verifizierung die Anwendung des Verfahrens auf Bereiche, in denen keine größeren Änderungen auftreten. Die Analyse der erzielten Ergebnisse zeigt, dass es mithilfe des entwickelten Verfahrens möglich ist, eingestürzte Gebäude automatisch zu erkennen und ihr Schadensbild detailliert zu bestimmen.

Universität Stuttgart

Frau Dipl.-Ing. SUSANNE BECKER promovierte am 15.11.2010 an der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie der Universität Stuttgart mit der Arbeit *„Automatische Ableitung und Anwendung von Regeln für die Rekonstruktion von Fassaden aus heterogenen Sensordaten“* zum Dr.-Ing.

Referent: Prof. Dr.-Ing. DIETER FRITSCH, Universität Stuttgart; Korreferenten: Prof. Dr. rer. nat. LUTZ PLÜMER, Universität Bonn; Prof. Dr. rer. nat. Dr. h.c. KURT ROTHERMEL, Universität Stuttgart

Kurzfassung:

3D-Stadtmodelle finden seit einigen Jahren in immer stärkerem Maß und in den verschiedensten Bereichen Verwendung. Sie bilden unter anderem die Grundlage bei Stadtplanungen, für virtuelle Stadtrundgänge oder für die Berechnung von Simulationen. Internet-

diensten wie Google Earth oder Microsoft Bing Maps ist es zu verdanken, dass 3D-Darstellungen von Gebäuden mittlerweile auch für eine breite Öffentlichkeit allgegenwärtig sind. Die erhöhte Nachfrage nach 3D-Gebäudemodellen verlangt nach effizienten Rekonstruktionsmethoden, die sich vor allem durch einen hohen Automationsgrad auszeichnen. Als Datengrundlage werden häufig luftgestützt erfasste LiDAR-Punktwolken oder Bilder eingesetzt. In der Natur dieser Daten liegt es begründet, dass die daraus rekonstruierten Gebäude üblicherweise zwar detaillierte Dachstrukturen, aber ebene, nicht ausmodellierte Fassadenflächen besitzen. Neue Trends in der Computergraphik, der Unterhaltungsindustrie oder im Bereich der Navigationssysteme treiben jedoch die Entwicklung wesentlich komplexerer und realistischerer Modelle voran. Der geforderte Detailreichtum ist dabei nicht auf die geometrische Ausgestaltung der Gebäudefassaden beschränkt, sondern bezieht ebenso den semantischen Informationsgehalt mit ein. Die für das Anreichern ebener Fassadenflächen notwendige Strukturinformation wird in der Regel aus terrestrisch erfassten LiDAR-Punktwolken oder Bilddaten abgeleitet. Rein datengetriebene Auswertungen führen nur bei qualitativ hochwertigen Messungen zu sicheren und realitätsnahen Ergebnissen. Je nach Aufnahmekonfiguration und Sensorgenauigkeit weisen Datensätze jedoch häufig eine heterogene Qualität bezüglich Genauigkeit, Abdeckung und Dichte auf. Dies gilt sowohl für Daten aus hoch spezialisierten Messsystemen, wenn beispielsweise Sichthindernisse zu partiellen Verdeckungen führen, als auch insbesondere für Daten aus kostengünstigen, einfach einsetzbaren Sensoren. Um auch im Fall unscharfer oder unvollständiger Sensordaten realistische 3D-Geometrien erzeugen zu können, muss die Rekonstruktion durch Objektwissen gestützt werden. Entsprechende Algorithmen integrieren Wissen beispielsweise in Form vordefinierter Regelsysteme, die eine prozedurale Modellierung von Gebäudestrukturen in einem bestimmten vorgegebenen architektonischen Stil erlauben.

Ziel der Dissertation ist die Verfeinerung bestehender grober Gebäuderepräsentationen, indem Fassadenelemente wie Fenster oder Türen in Form expliziter 3D-Geometrien mit be-

kannter Semantik integriert werden. Die Fassadenrekonstruktion soll vollautomatisch ablaufen und robust gegenüber fehlerhaften und unvollständigen Sensordaten sein. Zudem soll sie möglichst wenig vordefinierten Regeln unterworfen sein. Realisiert wird dies über eine Kombination datengetriebener und wissensbasierter Methoden. Die datengetriebene Komponente beruht im Wesentlichen auf der Interpretation terrestrischer LiDAR-Daten und auf dem Prinzip der Zellenzerlegung. In Gebäudebereichen mit guter Sensordatenqualität werden 3D-Fassadengeometrien extrahiert. Sie repräsentieren für das jeweilige Gebäude charakteristische Strukturen und dienen somit als eine Art Wissensbasis, aus der eine formale Grammatik, eine so genannte Fassadengrammatik, automatisch abgeleitet werden kann. Durch eine Segmentierung der Fassade in semantisch homogene Regionen werden in einem ersten Schritt die Grundbausteine der Grammatik, die Terminale, bestimmt. Ausgedrückt als eine Sequenz von Terminalen kann die Fassade anschließend über einen stringbasierten Algorithmus auf wiederkehrende und hierarchische Strukturen untersucht werden. Die erkannten Strukturen werden automatisch in Produktionsregeln überführt; die Fassadengrammatik ist damit vollständig bestimmt. Sie enthält die Informa-

tion, die zur Rekonstruktion von Gebäuden im Stil der beobachteten Fassade notwendig ist. Durch Anwendung der Produktionsregeln kann sie genutzt werden, um selbst für solche Fassadenbereiche realistische Fassadenstrukturen zu generieren, die entweder gar nicht beobachtet wurden oder mit Sensordaten von nur ungenügender Qualität abgedeckt sind.

Das Potenzial des vorgestellten Ansatzes wird anhand von Ergebnissen aufgezeigt. Für die Bewertung der erzeugten Fassadenmodelle werden Qualitätsmetriken bereitgestellt, über die sich eine Aussage treffen lässt, wie gut das architektonische Erscheinungsbild des jeweiligen Gebäudes wiedergegeben ist. Das Verfahren zur Fassadenrekonstruktion erweist sich als geeignet, um mit Beobachtungsdaten heterogener Qualität umzugehen, und ist darüber hinaus flexibel hinsichtlich der darstellbaren Fassadenstrukturen.

Die Dissertation ist in der Reihe C der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (ISSN: 0065-5325) unter der Nr. 658 online veröffentlicht (dgk.badw.de/index.php?id=12). Gleichzeitig erscheint die Arbeit in elektronischer Form bei der Bibliothek der Universität Stuttgart (elib.uni-stuttgart.de/opus/doku/e-diss.php).

Buchbesprechung

PETER KOHLSTOCK: Kartographie. 2. überarbeitete Auflage 2010, UTB 2568, Schöningh.

Der Autor Peter Kohlstock, studierter Kartograph (FH), Geodät (TU) und langjähriger Professor für Kartographie der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) Hamburg, legt das Werk **Kartographie** in zweiter Auflage vor. Der nur innen im Werk aufgeführte Untertitel lautet „*Eine Einführung*“. Der Titel suggeriert ein umfassendes Werk über Kartographie, was der Untertitel allerdings erheblich einschränkt.

Auf rund 200 Seiten, Satzspiegel 11,6 × 17,8 cm², behandelt der Autor die neun Kapitel *Einleitung, Abbildung der Erdoberfläche, Topographische Landesaufnahme, Topographische Karten, Bildkarten, Thematische Karten, Topographische und thematische Informationssysteme, Kartenherstellung und Karten-nutzung* mit zusammen 38 Unterkapiteln. Alle Kapitel behandeln ausschließlich deutsche Methoden und Verfahren, sowie dafür notwendige Vorstufen und damit „Kartographie“ aus rein deutscher Sicht. 150 Skizzen, Abbildungen und Beispiele, zumeist in schwarz/weiß, sowie sieben Seiten farbige Kartenaus-

schnitte und sieben Seiten Sachregister ergänzen das Werk.

Der Photogrammetrie, wie auch anderen Methoden der Landesaufnahme sind Unterkapitel gewidmet, die alten, erprobten, analogen Methoden sehr viel Platz einräumen. Den dabei und auch an anderen Stellen erweckten Eindruck, dass digitale und rechnergestützte Methoden erst zukünftig langsam Eingang in die Praxis finden, widerlegen die Unterkapitel *Digitale Situations-, Höhen- und Geländemodelle*, auch *ALK* und *ALB*, *Digitale Informationssysteme* und *ATKIS*, sowie *Digitale Atlanten* und *Web-Karten* im Internet.

In fast allen Kapiteln und Unterkapiteln springt der Autor nach Erwähnung alter, meist viele hundert Jahre zurückliegender Verfahren und Methoden jeweils auf moderne und verweist, zu deren vertiefter Erklärung, auf 28 Lehrbücher und die wesentlich umfangreichere, in vier Seiten aufgeführte Literatur.

Es fällt auf, dass Personen, auch in Zitaten, teilweise nur mit Namen, teilweise auch mit (abgekürzten) Vornamen, manchmal aber auch mit militärischem Rang, Beruf, Nationalität oder wissenschaftlicher Bedeutung, aufgeführt sind. Aber auch mit einem Hinweis: „(DLR 2007)“ kann der Leser kaum etwas anfangen.

Der Autor spricht die wesentlichen Fachgebiete der Geodäsie an: *Allgemeine* und *Höhere Geodäsie*, *Fernerkundung* mit *Photogrammetrie* und *Bildverarbeitung*, *Kataster-* und *Liegenschaftswesen*, aber auch *Kartographie*, die

sich alle gegenseitig benötigen und beeinflussen. Umfassend kann das jedoch auf dem zur Verfügung stehenden begrenzten Platz nicht gelingen. Der Autor selbst schreibt, „der sachverständige Umgang mit Karten ... brauche kein *Spezial-*, sondern *Orientierungswissen* als Basis für deren optimale und sachgerechte Nutzung“. Dadurch ist der umfassende Titel „Kartographie“ noch wesentlich stärker eingeschränkt, als er, wie auch der im Werk verborgene Untertitel suggerieren.

Bleibt zu überlegen, welcher Leserkreis angesprochen sein könnte: Fachleute der Geodäsie und deren Studierende werden kaum zum Leserkreis gehören. Der Inhalt des Werkes kann für Letztere kaum zum Bestehen von Prüfungen über die im Werk behandelten geodätischen Fächer genügen. Zu bezweifeln ist auch, dass der durchschnittliche Kartennutzer vor Gebrauch von Karten das Werk zu Rate ziehen würde. Hilfreich kann es für Anwender von Karten aus benachbarten Gebieten zur Geodäsie sein, die nur *Orientierungswissen* als Überblick suchen. Dies besonders, wenn sie für Ableitungen, Statistiken und Zusammenfassungen aus dem Karteninhalt mehr über dessen Entstehung und daraus resultierende Grenzen für seine richtige Anwendung benötigen oder wissen wollen. Brauchen Sie dazu *Spezialwissen*, so helfen die Verweise auf Lehrbücher und die zitierte Literatur.

FRIEDRICH S. KRÖLL, Neubiberg/München

Veranstaltungskalender

2011

13.–16. Juni: 7th **International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT11)** in Cracow, Polen. www.mmtcracow2011.pl/

14.–17. Juni: ISPRS WG IV/2 **Workshop on High Resolution Earth Imaging for Geospatial Information** in Hannover. www.commission4.isprs.org/wg2/

15.–17. Juni: **GEOINFORMATIK 2011** in Münster. www.geoinformatik2011.de/

23. Juni: 4. **Hamburger Forum für Terrestrisches Laserscanning** an der HafenCity Universität **Hamburg**. www.geomatik-hamburg.de/tls/tls2011/tls_2011.html

26.–27. Juni: ISPRS WG V/4, III/2+4, IV/4+8 **joint Workshop on 3D City Modelling & Applications** in Wuhan, China. www.lmars.whu.edu.cn/3DCMA2011/

3.–8. Juli: 25th **International Cartographic Conference (ICC2011)** in **Paris**, Frankreich. www.icc2011.fr/

18.–20. Juli: ISPRS WG II/3 **International Symposium of Spatio-Temporal Analysis & Data Mining** in **London**, Großbritannien. standard.cege.ucl.ac.uk/workshops/STDM2011/

29.–31. August: ISPRS **WG V/3 Laser Scanning 2011** in **Calgary**, Kanada. www.ucalgary.ca/laserscanning2011/

5.–9. September: 53. **Photogrammetrische Woche** an der Universität **Stuttgart**. www.ifp.uni-stuttgart.de/phowo/index.html

12.–16. September: XXIIIth **International CIPA-HD Symposium** in **Prague**, Tschechien. cipa.icomos.org/index.php?id=9

14.–16. September: ISPRS ICWG I/V **International Conference on Unmanned Aerial**

Vehicle in Geomatics (UAV-g) an der **ETH Zürich**, Schweiz. www.uav-g.ethz.ch

27.–29. September: **INTERGEO 2011** in **Nürnberg**. Infos: www.intergeo.de/de/deutsch/index.php

5.–7. Oktober: **Photogrammetric Image Analysis 2011 (PIA11)** in **München**. www.pia11.tum.de

2012

1.–2. Februar: 11. **Oldenburger 3D-Tage**. Infos: www.jade-hs.de/fachbereiche/bauwesen-und-geoinformation/abteilung-geoinformation/oldenburger-3d-tage/

24. August – 3. September: **XXII ISPRS Congress 2012** in **Melbourne**, Australien. www.isprs2012-melbourne.org/

Neuerscheinungen

REINHARD HÜTTL, 2011. Ein Planet voller Überraschungen – Neue Einblicke in das System Erde. 1. Auflage, 340 Seiten, ISBN 978-3-8274-2470-9, Ein Spektrum Akademischer Verlag Produkt, Springer.

PETER KOHLSTOCK, 2010. Kartographie. 2. überarbeitete Auflage, 227 Seiten, ISBN 978-3825225681, UTB 2568, Schöningh, Paderborn.

PETER KOHLSTOCK, 2011. Topographie - Methoden und Modelle der Landesaufnahme. 230

Seiten, ISBN 978-3-11-022675-1, de Gruyter, Berlin.

KARL KRAUS, 2011. Photogrammetrie Band 1 - Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. 8. Auflage, bearbeitet von Norbert Pfeifer, Josef Jansa und Camillo Ressler, 500 S., ISBN 978-3-11-020961-7, de Gruyter, Berlin.

WOLFGANG TORGE & THOMAS MÜLLER, 2011. Geodesy. 4. Auflage, 500 Seiten, ISBN 978-3-11-020718-7, de Gruyter, Berlin.

Weitere Informationen

JÖRN BROCKMANN, CARSTEN HAUB, KLAUS-ULRICH KOMP, EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH, Oststraße 2-18, D-48145 Münster, Germany, www.gmfs.info.

SUDAN FEDERAL MINISTRY OF AGRICULTURE (FMoA), General Administration of Planning & Agricultural Economics, P.O.BOX 10296, Khartoum, Sudan.

MERIS-Data: © EUROPEAN SPACE AGENCY, Via Galileo Galilei, I-00044 Frascati (Rome), Italy.

Korporative Mitglieder

Firmen

AEROWEST GmbH
AICON 3D Systems GmbH
Alpha Luftbild GmbH
aphos Leipzig AG
Becker GeoInfo GmbH
Bernhard Harzer Verlag GmbH
Blom Deutschland GmbH
Brockmann Consult
bsf swissphoto
Büro Immekus
CGI Systems GmbH
con terra GmbH
Creaso GmbH
DEFINIENS AG
DELPHI IMM GmbH
Deutsches Bergbau-Museum
EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH
ESG Elektroniksystem- und Logistik-GmbH
ESRI Geoinformatik GmbH
EUROPEAN SPACE IMAGING
Eurosense GmbH
fokus GmbH
g.on experience gmbh
GAF GmbH
GeoCad GmbH
GeoCart Herten GmbH
GeoContent GmbH
Geoinform. & Photogr. Engin. Dr. Kruck & Co. GbR
geoplana Ingenieurgesellschaft mbH
GEOSYSTEMS GmbH
GGs - Büro für Geotechnik, Geoinformatik, Service
Hansa Luftbild AG
IGI - Ingenieur-Gesellschaft für Interfaces mbH
ILV Ing.-büro für Luftbilddat. und Vermessung
Imetric 3D GmbH
Infoterra GmbH
INVERS - Industrievermessung & Systeme
J. Linsinger ZT-GmbH
Jena-Optronik GmbH
KAZ Bildmess GmbH
Leica Geosystems GmbH
Luftbild Brandenburg GmbH Planer + Ingenieure
Luftbilddatenbank-Würzburg
Messbildstelle GmbH
Microsoft Photogrammetry

MILAN Geoservice GmbH
PHOENICS GmbH
PMS - Photo Mess Systeme AG
RIEGL Laser Measurement Systems GmbH
RWE Power AG, Geobasisdaten/Photogrammetrie
technet GmbH
TerraVista Umweltdaten GmbH
TRIGIS Vermessung + Geoinformatik GmbH
Trimble Germany GmbH
trimetric 3D Service GmbH
Wichmann, VDE Verlag GmbH
Z/I Imaging Ltd.
Behörden
Amt für Geoinformationswesen der Bundeswehr
Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
Bundesmin. für Ernäh., Landw. u. Verbraucherschutz
DB Netz AG
Hess. LA für Bodenmanagement und Geoinformation
Innenministerium NRW, Gruppe Vermessungswesen
Inst. für Umwelt- und Zukunftsforschung
LA für Geoinformation u. Landentw., Baden-Württem.
LA für Vermessung und Geoinformation, Bayern
LB Geoinformation und Vermessung, Hamburg
LB f. Küstenschutz, Nationalpark u. Meeresschutz, SH
Landesvermessung und Geobasisinformation Nieders.
Märkischer Kreis, Vermessungs- und Katasteramt
Regierungspräsid. Tübingen, Abt. 8 Forstdirektion
Regionalverband Ruhr
Staatsbetrieb Sachsenforst Pirna
Stadt Bocholt, Fachbereich 31
Stadt Düsseldorf, Vermessungs- und Katasteramt
Stadt Köln, Amt für Liegensch., Verm. und Kataster
Stadt Wuppertal, Verm., Katasteramt und Geodaten
Thüringer LA für Vermessung und Geoinformation
Hochschulen
BTU Cottbus, Lehrstuhl für Vermessungskunde
FH Frankfurt a.M., FB 1, Studiengang Geoinformation
FH Mainz, Inst. f. Raumbez. Inform.- und Messtechn.
FH Oldenburg, Inst. für Angew. Photogr. und Geoinf.
HCU HafenCity Universität Hamburg, Geomatik
HfT Stuttgart, Vermessung und Geoinformatik
HS Bochum, FB Vermessung und Geoinformatik
HS Karlsruhe, FB Geoinformationswesen
HTW Dresden, FB Vermessungswesen/Kartographie
Ruhr-Uni Bochum, Geographisches Institut

RWTH Aachen, Geodätisches Institut
TU Bergak. Freiberg, Inst. f. Markscheid. u. Geodäsie
TU Bergak. Freiberg, Inst. für Geologie, RSG
TU Berlin, Computer Vision & Remote Sensing
TU Berlin, Institut f. Geodäsie u. Geoinformationstechn.
TU Braunschweig, Inst. für Geodäsie und Photogr.
TU Clausthal, Inst. für Geotechnik und Markscheidew.
TU Darmstadt, Inst. für Photogrammetrie und Kartogr.
TU Dresden, Inst. für Photogrammetrie und Fernerk.
TU München, FG Photogrammetrie und Fernerk.
TU Wien, Inst. für Photogrammetrie und Fernerk.

Uni Bonn, Inst. für Photogrammetrie
Uni Göttingen, Inst. für Waldinv. und Waldwachstum
LUH Hannover, Inst. für Kartogr. und Geoinformatik
LUH Hannover, Inst. für Photogrammetrie und GeoInf.
Uni Heidelberg, IWR Interdis. Zentr. f. Wiss. Rechnen
Uni Karlsruhe, Inst. für Photogrammetrie und Fernerk.
Uni Kassel, FB Ökologische Agrarwissenschaften
Uni Kiel, Geographisches Institut
Uni Stuttgart, Inst. für Photogrammetrie
Uni Würzburg, Geographisches Institut
Uni zu Köln, Geographisches Institut