

PRG

Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation

Journal for Photogrammetry, Remote Sensing
and Geoinformation Science

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

Jahrgang 2013, Heft 6

Hauptschriftleiter:
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kresse

Schriftleiter:
Prof. Dr.-Ing. Stefan Hinz, Privatdozent Dr. techn. Franz
Rottensteiner, Prof. Dr. rer.nat. Ulrich Michel,
Prof. Dr. rer.nat. Lars Bernard und Dr.-Ing. Eckhardt Seyfert

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



E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung
(Nägele u. Obermiller) Stuttgart 2013



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.



GeoUnion
Alfred-Wegener-Stiftung

Herausgeber:

© 2013 Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V.
Präsident: Prof. Dr. Thomas Kolbe, Technische Universität München, Institut für Geodäsie, GIS und Landmanagement, Lehrstuhl für Geoinformatik, Arcisstraße 21, 80333 München, Germany, Tel. +49-89-289-23888
Geschäftsstelle: Tanja Nyc, c/o Technische Universität München, Institut für Geodäsie, GIS und Landmanagement, Lehrstuhl für Geoinformatik, Arcisstraße 21, 80333 München, Germany, Tel.: +49-89-289-22578, e-mail: geschaeftsstelle@dgpf.de

Published by: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Johannesstraße 3A, 70176 Stuttgart, Germany, Tel.: +49-711 351456-0, Fax: +49-711 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. Wolfgang Kresse, Hochschule Neubrandenburg, Fachbereich Landschaftswissenschaften und Geomatik, Brodaer Straße 2, 17033 Neubrandenburg, Germany, e-mail: kresse@hs-nb.de
Schriftleiter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Hinz, Karlsruher Institut für Technologie – KIT, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Englerstraße 7, 76131 Karlsruhe, Germany, e-mail: stefan.hinz@ipf.uni-karlsruhe.de, Privatdozent Dr. techn. Franz Rottensteiner, Leibniz Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Nienburger Straße 1, 30167 Hannover, Germany, e-mail: rottensteiner@ipi.uni-hannover.de, Prof. Dr. rer. nat. Ulrich Michel, Pädagogische Hochschule Heidelberg, Czernyring 22/11–12, 69115 Heidelberg, Germany, e-mail: michel@ph-heidelberg.de, Prof. Dr. rer. nat. Lars Bernard, Technische Universität Dresden, Fachrichtung Geowissenschaften, Helmholtzstraße 10, 01062 Dresden, Germany, e-mail: lars.bernard@tu-dresden.de, und Dr.-Ing. Eckhardt Seyfert, Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg, Heinrich-Mann-Allee 103, 14473 Potsdam, Germany, e-mail: eckhardt.seyfert@geobasis-bb.de

Erscheinungsweise: 6 Hefte pro Jahrgang.

Bezugspreis im Abonnement: € 229,- 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, 70176 Stuttgart, Germany, Tel.: +49-711 351456-0; Fax: +49-711 351456-99.
e-mail: mail@schweizerbart.de, Internet: <http://www.schweizerbart.de>

Bernhard Harzer Verlag GmbH, Westmarkstraße 59/59a, 76227 Karlsruhe, Germany, Tel.: +49-721 944020, Fax: +49-721 9440230, e-mail: Info@harzer.de, Internet: www.harzer.de

Printed in Germany by Tutte Druckerei & Verlagsservice GmbH, 94121 Salzweg, Germany.

PFG – Jahrgang 2013, Heft 6

Inhaltsverzeichnis

Originalbeiträge

BENDIG, J., BOLTEN, A. & BARETH, G.: UAV-based Imaging for Multi-Temporal, very high Resolution Crop Surface Models to monitor Crop Growth Variability	551
SCHIEWE, J. & KINKELDEY, CH.: Konzeption und Implementierung einer fallspezifischen Unsicherheitskette im Rahmen fernerkundlicher Auswertungen	563
MEINEL, G. & BURCKHARDT, M.: Die Geobasisprodukte Hausumringe und Hauskoordinaten – Charakterisierung und Aufbereitung für Gebäudebestandsanalysen.	575
WESTFELD, P. & MAAS, H.-G.: Integrated 3D Range Camera Self-Calibration	589

Beitrag aus Wissenschaft und Praxis

SCHMITT, M., MAGNARD, CH., STANKO, S., ACKERMANN, CH. & STILLA, U.: Advanced High Resolution SAR Interferometry of Urban Areas with Airborne Millimetrewave Radar.	603
--	-----

Mitteilungen

Berichte von Veranstaltungen	
Geospatial World Forum, 13. – 21. May 2013, Rotterdam, The Netherlands.	619
International SIG 3D and OGC Workshop on Requirements for CityGML 3.0, 20. – 21. Juni 2013, Technische Universität München	620
24. Internationales CIPA Symposium, 2. – 6. September 2013, Straßburg, Frankreich	622
Hochschulnachrichten	
Universität Stuttgart, Dissertation Rongfu Tang	624
Neuerscheinungen	626
Veranstaltungskalender	626
Jahresübersicht 2013	
Vorstand der PFG	628
Ehrenmitglieder DGPF	629
Neue Mitglieder der DGPF	629
Arbeitskreise der DGPF	629
Berichterstatter für ISPRS und CIPA	631
Gutachter der PFG im Jahres 2013	632
Korporative Mitglieder	634
Jahresinhaltsverzeichnis	635

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



UAV-based Imaging for Multi-Temporal, very high Resolution Crop Surface Models to monitor Crop Growth Variability

JULIANE BENDIG, ANDREAS BOLTEN & GEORG BARETH, Köln

Keywords: agriculture, crop growth, DEM, plant height, UAV

Summary: This paper describes the generation of multi-temporal crop surface models (CSMs) with very high resolution of < 0.05 m. Data collection was carried out with a low-cost and low-weight UAV-system with a weight of less than 5 kg and the possibility of mounting different sensors. Key focus is the detection of crop growth variability and its dependency on cultivar, crop treatment and stress. The study area is a barley experiment field in Bonn in the west of Germany. Four replications of four cultivars of barley were investigated of which half of them were treated with a fungicide. Five UAV-campaigns were carried out during the growing season between early May and late July 2012. Ground control points (GCPs) measured with a HiPer Pro Topcon DGPS allowed for appropriate ground truth (< 0.02 m). Ground based infield control surveys on three dates served as validation of the method. Additionally, various destructive and non-destructive ground data were collected. The stereo images captured were processed into CSMs by using the structure-from-motion (SfM) software Agisoft PhotoScan. Generated plant heights ranged between 0.16 m and 0.983 m. R^2 ($n = 32$) for the correlation between plant heights in the CSM and infield control surveys is 0.69. Lower plant heights were detected in those plots of the field where no fungicide was applied. Height differences between cultivars were observed and increased during growing season. The accuracy assessment of DEMs generated with the proposed UAV-based imaging showed a correlation coefficient of 0.99 ($n = 10$) between the DGPS GCPs and the DEMs with a mean difference of 0.01 m in z-direction.

Zusammenfassung: *Monitoring des Pflanzenwachstums mit Hilfe multitemporaler und hoch auflösender Oberflächenmodelle von Getreidebeständen auf Basis von Bildern aus UAV-Befliegungen.* Dieser Beitrag beschreibt die Erzeugung von multitemporalen Oberflächenmodellen von Getreidebeständen (crop surface models, CSMs) mit einer sehr hohen Auflösung von < 0.05 m. Die Datenerfassung wurde mit einem kostengünstigen UAV-System mit einem Gewicht von weniger als 5 kg durchgeführt, welches die Möglichkeit der Anbringung verschiedener Sensoren bietet. Schwerpunkt war die Detektion der Variabilität im Pflanzenwachstum und die Abhängigkeit von Sorte, Pflanzenbehandlung und Stress. Das Untersuchungsgebiet liegt in Bonn im Westen Deutschlands und besteht aus 32 Testflächen, die mit viermaliger Wiederholung mit je vier Gerstensorten bepflanzt wurden. Die Hälfte der Pflanzen wurde mit einem Fungizid behandelt. Die Untersuchung umfasste fünf UAV-Kampagnen während der Vegetationsperiode zwischen Anfang Mai und Ende Juli 2012. Passpunkte (GCPs), gemessen mit einem HiPer Pro Topcon DGPS, sorgten für eine entsprechende Georeferenzierung (< 0.02 m). Kontrollmessungen im Feld an drei Terminen dienten zur Validierung der Methode. Zusätzlich wurden weitere destruktive und nicht-destruktive Felddaten erhoben. Aus den Stereobildern wurden unter Verwendung der Structure-from-Motion (SfM) Software Agisoft PhotoScan CSMs erzeugt. Die abgeleiteten Pflanzenhöhen lagen zwischen 0,16 m und 0,983 m. Das R^2 für die Korrelation zwischen Pflanzenhöhe im CSM und den Kontrollmessungen liegt bei 0,69. Niedrigere Pflanzenhöhen befanden sich in ungespritzten Teilen des Feldes. Höhenunterschiede zwischen den Sorten wurden festgestellt, die sich während der Vegetationsperiode verstärkten. Die Genauigkeitsanalyse des UAV-basierten DEMs zeigte einen Korrelationskoeffizienten von 0,99 zwischen DGPS und DEM, mit einer mittleren Differenz von 0,01 m in Z-Richtung.

1 Introduction

Modelling canopy surfaces is a common application of remote sensing methods. In forestry, stereo photogrammetry or airborne laser scanning (ALS) are used for the extraction of canopy heights and surface modelling (ST-ONGE et al. 2008). Spaceborne sensors like TerraSAR-X combined with TanDEM-X enable stereo radargrammetric modelling of canopy heights (PERKO et al. 2010).

Precision agriculture can benefit greatly from remote sensing (MULLA 2012). Small experiment fields (<5 ha) like the one presented in this study can be easily monitored using low-weight unmanned aerial vehicles (UAVs). Producing multi-temporal datasets of the whole vegetation period is essential for obtaining reliable results in such experiments.

UAVs are already in use for capturing optical, spectral and thermal information (EISENBEISS & SAUERBIER 2011, GRENZDÖRFFER et al. 2008, HUNT et al. 2010, HARTMANN et al. 2012).

The UAV-system used in this study is a low-cost multi-sensor system with a weight of less than 5 kg, a so called Mini-UAV (EISENBEISS 2009). Using a high resolution RGB consumer camera, stereo images can be captured and processed into digital crop surface models (CSMs) (Fig. 1).

The key focus is to detect differences in plant height depending on cultivar, phenology, crop treatment, or stress. The non-inva-

sive measurement of plant height is important due to its correlation to biomass and other crop parameters (HANSEN & SCHJOERRING 2003, THENKABAIL et al. 2000). In this context, HOFFMEISTER et al. (2010) introduced the concept of multi-temporal CSMs for monitoring plant growth between phenological stages with terrestrial laserscanning. Comparison of the CSMs for different phenological stages allows for the detection of crop growth variability and absolute plant height. This approach of analysing CSMs is shown in Fig. 1. The plant height (PH), e.g. at time t_3 results from t_3 minus t_0 . The plant growth (PG), for example from time t_1 to time t_3 results from t_3 minus t_1 .

In this study, the idea of investigating multi-temporal CSMs is transferred to very high resolution CSMs derived from stereo images captured by a UAV.

2 Data Acquisition

2.1 Study Area and Dataset

The study area is located in the city of Bonn in the west of Germany (Fig. 2). In 2012 the *Institute for Agricultural Plants and Resource Protection* (INRES) – *Horticultural Science* established an experiment field with four different cultivars of barley with different resistances to plant diseases.

The aim of the experiment is to determine the response to natural pathogens using non-

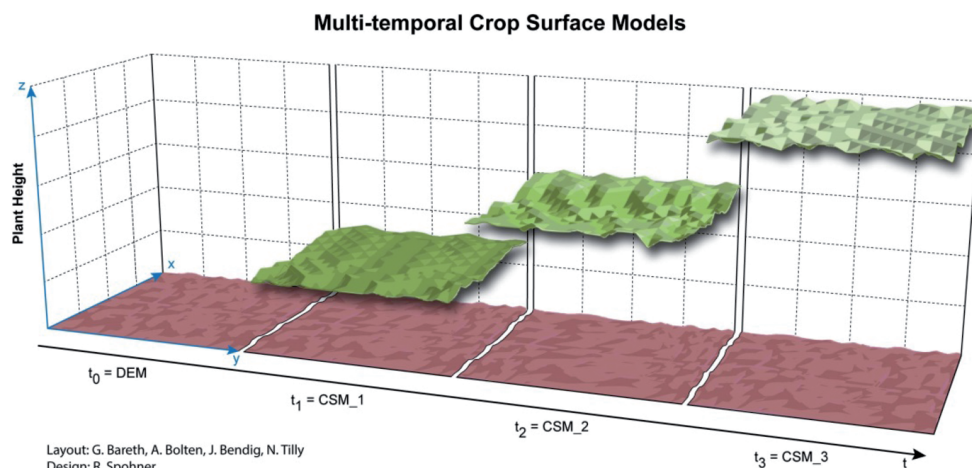


Fig. 1: Multi-temporal crop surface models (CSMs).

destructive measurement techniques. A protective and curative fungicide against three common plant diseases was applied to the control sample plants (grey plots in Fig. 2). All other horticultural activities were left unchanged. Four replications of every cultivar for both treatments were planted in 1.5 m x 7 m plots in a randomised order surrounded by boundary plots which were not used for measurements.

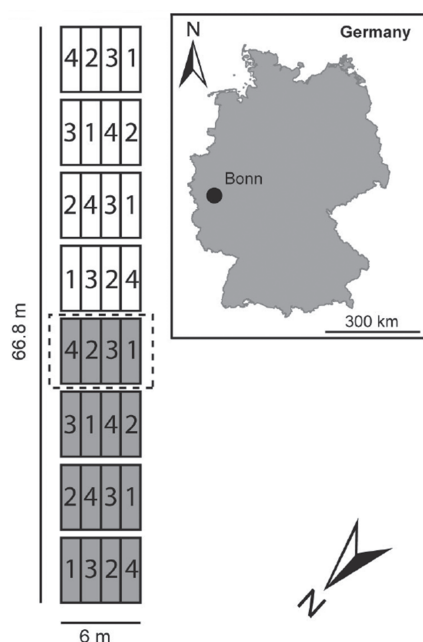


Fig. 2: Study area – 4 replications of 4 cultivars of barley (1, 2, 3, 4) planted in randomised order, two treatments. Grey: treated plots, white: untreated plots, dashed line: replication 4 (treated).



Fig. 3: MK-Oktokopter by HiSystems GmbH mounted with RGB sensor.

The ground based data collection was separated into destructive sampling of biomass, plant N- and chlorophyll content, and non-destructive data acquisition of plant height, hyperspectral, and fluorescence data. Field data campaigns were carried out repeatedly during the growing season. UAV campaigns were conducted on 14.5., 25.5., 5.6, 18.6. and 23.7.12 using an RGB sensor (see section 2.3). 18 ground control points (GCPs) were established on the corners of the plots for ground truth. In-field control surveys of the plant heights were carried out on the 25.5., 5.6. and 18.6.12.

2.2 Platform

The UAV-system is a MK-Oktokopter by HiSystems GmbH (HiSYSTEMS GMBH 2013). It consists of a point-symmetrical frameset composed of aluminium and glass fibre reinforced plastics (Fig. 3). The total weight of the system including battery is less than 2.5 kg. An additional payload of up to 1 kg is possible. The cost of the entire system not including the sensor is around 3,000 €. The eight engines are equipped with high performance propellers.

The electronics include high-quality gyroscopes, a pressure sensor, a compass module and a GPS module (MIKROKOPTER 2013a). Using the open source software Mikrokoopter-Tool (MIKROKOPTER 2013b) pre-defined flight routes in a sense of an auto-pilot can be carried out in autonomous flight mode. Lithium polymer batteries with up to 6,600 mAh capacity enable flight times of around 15 minutes depending on the payload. The additional transmitter channels of the 2.4 GHz transmitter remote control are used for camera triggering (BENDIG et al. 2012).

2.3 Sensor

The RGB sensor is a Panasonic Lumix DMC GF3 with a Lumix G 20 mm (F1.7 ASPH) lens. The weight is 400 g and the sensor resolution is 4016 x 3016 (12 million) pixel (PANASONIC 2013).

The field of view (FOV) of the camera is 48.5° horizontal and 33.4° vertical resulting in an image size of 90 m x 60 m at a distance of

100 m. Aperture and exposure times are adjusted and fixed manually prior to each flight. Due to the manual triggering of the camera an individually adapted camera holder with a mechanical trigger is used and operated by the remote control of the UAV-system.

2.4 Data Acquisition

Wooden poles with 0.3 m x 0.3 m highly visible targets attached to them were used as GCPs. Those were measured using a HiPer Pro Topcon DGPS with a horizontal and vertical accuracy of < 0.01 m according to own evaluations (0.02 m according to ASCOS PED 2010). Horizontal coordinates of eight data acquisition points were taken in the field which were used as waypoints for the flight route, resulting in a 50% overlap of the images, covering the whole experimental field in one flight. Several flights were carried out for each field campaign with the sensor mounted in nadir position with constant orientation and flying height. For the Panasonic Lumix DMC GF3 a height of 30 m was chosen resulting in a FOV of 18 m x 27 m and ground resolution of 0.006 m.

For the infield control surveys a ruler was placed next to the plants on three positions in each of the 32 plots to determine the mean plant height per plot with a 0.01 m precision.

Plant heights per plot vary 0.1 m on an average.

2.5 Data Processing

The overall workflow of data processing is presented in Fig. 4. For the generation of the CSM the multi-view 3D reconstruction software Agisoft PhotoScan 0.9.0 (AGISOFT 2013) was used which is based on a structure-from-motion (SfM) algorithm (VERHOEVEN 2011). SfM allows for the estimation of the unknown camera positions through comparison of detected image feature points, e. g. object edges, in multiple images (SZELISKI 2010). Despite of the fact that Agisoft PhotoScan and, in general, the use of SfM algorithms for DEMs derived from UAV-based imagery is becoming more and more popular since 2012, quite little literature on comparable studies has been published. Papers by NEITZEL & KLONOWSKI (2011), VERHOEVEN et al. (2012) and DE REU et al. (2013) suggest that the software shall be well suited for such applications.

For each date (except 23.7.) two partly overlapping tiles were generated, one covering the treated plots of the experiment field and one covering the untreated plots. However, a complete model could be generated as well. Due to computation and calculation time, we split the model into two parts. The point clouds con-

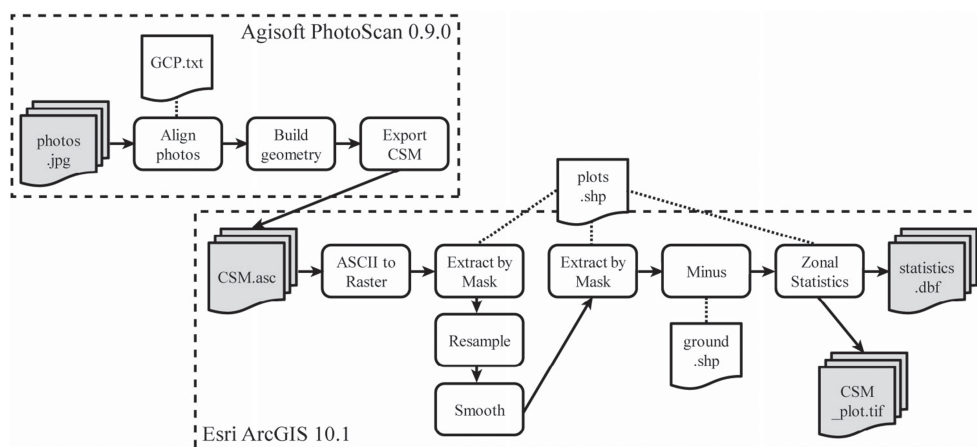


Fig. 4: Data Processing workflow for the generation of CSM (CSM.asc) from RGB images captured by UAV (photos.jpg) in Agisoft PhotoScan and further processing for analysis based on each plot in Esri ArcGIS.

sisted of 12 million points per model on average. As a result, the 4th replication of the untreated plots was covered in both datasets (Fig. 5).

GCPs were identified manually on each photo and assigned to the coordinates measured by the DGPS (Fig. 4). In a batch process the images were aligned to each other, the CSM was built.

Via an ASCII-file it was transferred to a raster file in Esri ArcGIS 10.1. A shapefile containing the outlines of the plots, reduced by a 0.3 m inside buffer to reduce plot boundary effects, served as a mask to extract areas of interest (AOI). After that, data were resampled to a raster size of 0.1 m and smoothed by calculating the focal mean of 3 x 3 pixel rectangles. A ground model was constructed from z-data of the GCPs (t_0 in Fig. 1). Each CSM was subtracted from the ground plane using the AOI shapefile to obtain plant height per plot. In a last step, general statistics including mean plant height and standard deviation were calculated for each date and plot.

Five datasets were collected during the growing season of which four could be used for analysis. For t_5 (23.7.), the CSM could only be generated for parts of the experiment field

due to image quality (see Tab. 1). Image quality was decreased because of strong wind during data collection and lodging caused by a thunderstorm a few days before. Furthermore, parts of the CSM for t_3 (16.5.) and t_4 (18.6.) could not be modelled satisfactorily (t_3 : replications 1–4 treated, replication 2 untreated; t_4 : replication 4 treated, replication 3 and 1 untreated) resulting in unrealistic values for plant height. Those datasets were partly excluded from the analysis and are referred to as “selected data” in the following (Tab. 2, Fig. 7). Results of the analysis are presented for all data and selected data of sufficient quality.

3 Results

3.1 Statistics

Tab. 1 illustrates minimum, maximum, range, mean, and standard deviation (std.) of plant height for the whole experimental field according to date (t) and measurement technique (CSM or infield control survey). Plant heights generated from CSMs range from 0.16 m to 0.983 m over all dates. Ranges for

Tab. 1: Descriptive statistics of plant heights (m) derived from CSMs and infield control survey according to date (std. = standard deviation, RMSE = root-mean-square error).

	date	t_1 14.5.12	t_2 25.5.12	t_3 5.6.12	t_4 18.6.12	t_5 23.7.12
CSM	min	0.160	0.354	0.595	0.454	0.228
	max	0.309	0.512	0.905	0.874	0.983
	range	0.149	0.158	0.310	0.420	0.755
	mean	0.241	0.451	0.772	0.688	0.595
	std.	0.028	0.032	0.062	0.075	0.160
	RMSE	0.256	0.453	0.815	0.683	0.892
infield control survey	min	no data	0.370	0.685	0.850	no data
	max		0.590	0.855	1.060	
	range		0.220	0.170	0.210	
	mean		0.509	0.763	0.950	
	std.		0.054	0.045	0.058	
	RMSE		0.702	0.755	0.940	

each date vary between 0.149 m and 0.755 m and increase with development of vegetation ($\text{range}(t_5) > \text{range}(t_1)$). The mean plant height increases for t_1 to t_3 and decreases for t_4 to t_5 . Standard deviation increases continuously with the vegetation development ($\text{std.}(t_5) > \text{std.}(t_1)$). For the infield control surveys, plant heights range between 0.370 m and 1.06 m for all dates (t_2 to t_4). Ranges for each date vary between 0.17 m and 0.22 m which is significantly lower compared to the CSM heights. Mean plant height increases from t_2 to t_4 while the standard deviation varies without a trend.

The average difference of mean plant height between CSM and infield control survey is under 0.01 m for t_2 and t_3 but one magnitude higher for t_4 . R^2 (correlation, $n = 32$) for both measurement techniques are 0.55 (t_2), 0.22 (t_3) and 0.71 (t_4). The overall correlation is 0.69 ($n = 96$) for the three dates altogether. For selected data, overall correlation decreases to 0.62 ($n = 64$), because some values were removed ($R^2 t_3 = 0.43$ ($n = 12$), $R^2 t_4 = 0.68$ ($n = 20$)).

3.2 Crop Surface Models

In Fig. 5 an example of the generated CSM with 0.006 m resolution is presented for t_2 (25.5.) starting with replication 1 (treated) in the north. The experiment plots, e. g. red rectangle in Fig. 5, are surrounded by two boundary plots on one side and three on the other side.

The plots can be clearly distinguished from each other and from the surrounding bare soil. Since the model was separated into two tiles, seamlines are visible. Tiles were not merged in order to keep the original data and to facilitate the comparison between the datasets. A closer look at replication 4 (treated) for t_0 to t_3 (Fig. 6) allows for the detection of possible differences in the datasets. Blue surfaces show plant height for t_1 (14.5.). An increasing height difference to the south (mean: 0.08 m, max: 0.18 m) is noticeable. For t_2 (25.5.), green surfaces in Fig. 6, the maximum difference is considerably lower with 0.11 m and the mean

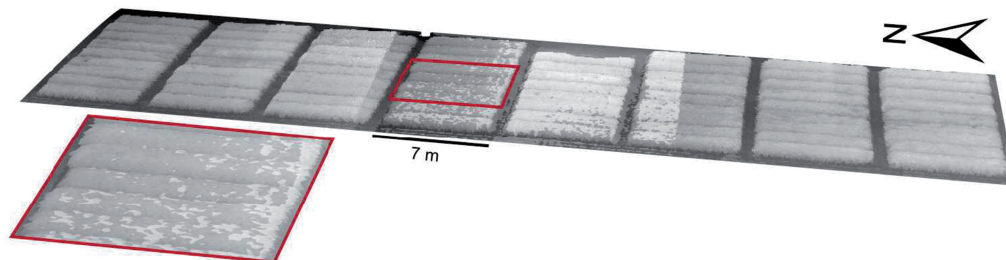


Fig. 5: CSM – Overview of study area (t_2 : 25.5.2012), red rectangle: replication 4 (treated) (Esri ArcScene).

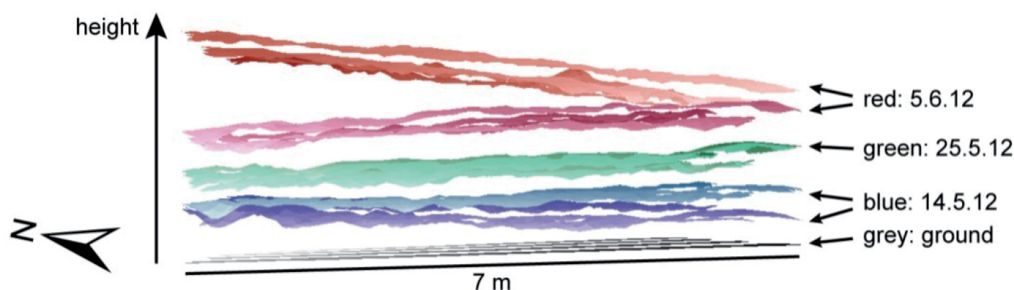


Fig. 6: Cross section of CSM – replication 4 (treated): height comparison ($t_0 - t_3$) for two datasets of overlapping tiles (t_0 = grey, t_1 = light and dark blue, t_2 = light and dark green, t_3 = light and dark red) (Esri ArcScene, height 2 times exaggerated).

difference 0.02 m. The red surfaces in Fig. 6 of t_3 (5.6.) show maximum differences of 0.36 m and a mean of 0.01 m due to the surface on top increasing in height towards north.

3.3 Plant Height Development

The analysis of plant height and the growth according to cultivar and treatment is presented

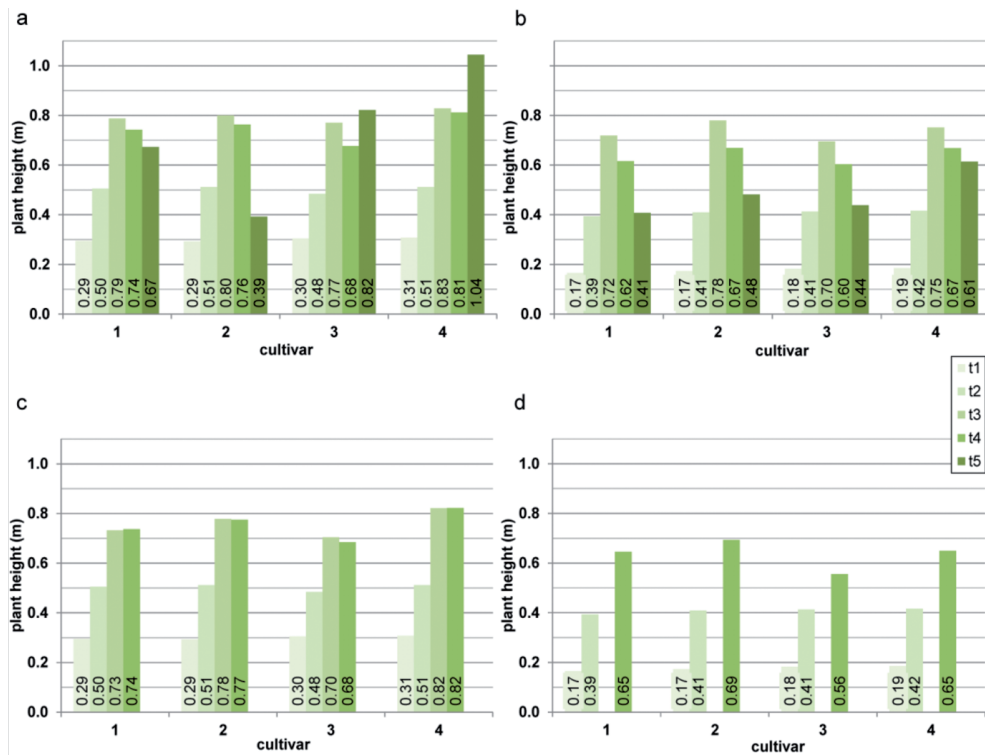


Fig. 7: CSM – mean plant height comparison according to date, cultivar and treatment; a: treated (all data), b: untreated (all data), c: treated (selected data), d: untreated (selected data) (for definition of “selected data” see 2.4.).



Fig. 8: Experimental design of accuracy assessment (left: photo, right: DEM): Reference points are four GCPs, two different sized Peli Cases and 4 corners of the UAV transport box.

in Tab. 2 and Fig. 7 for all data and selected data (in brackets).

Fig. 7 shows that plants in untreated plots are generally smaller than plants in treated plots. Numbers in Tab. 2 give more details, for example cultivar 1: 0.295 m compared to 0.165 m for t_1 minus t_0 . Looking at column t_4 minus t_0 , plants in untreated plots are 0.109 m (0.118 m) lower on average (mean height treated: 0.749 m (0.755 m) and untreated: 0.639 m (0.636 m)).

In general, height differences increase between cultivars during the growing season, e. g. orange bars compared to green bars in Fig. 7a or Tab. 2: 0.016 m for t_1 minus t_0 compared to 0.135 m for t_4 minus t_0 for treated plots, all data. Mean heights between cultivars differ by 0.135 m (0.138 m) for treated plots and 0.065 m (0.137 m) respectively for untreated plots (t_4 minus t_0). For t_4 minus t_0 cultivar 3 has the smallest heights while the cultivar with most growth is cultivar 4 for the treated plots and cultivar 2 for the untreated plots (t_4 minus t_0).

3.4 Accuracy Assessment

To determine the quality of DEMs generated from stereo images acquired with the UAV-system an accuracy assessment was carried out (Fig. 8). X-, y- and z-coordinates of test targets and four GCPs were measured using DGPS and compared to pixel values in the DEM (flying height 30 m). The test targets were two Peli Cases of different sizes of which each midpoint was measured and the transport box for the UAV (0.75 m x 0.75 m x 0.365 m) of which the four corners were measured. Z-values and differences between DGPS and DEM are presented in Tab 3. Numbers in italic mark differences measured for the four corners of the transport box. The mean height difference is 0.01 m which is in the same order as the accuracy of the DGPS measurement of 0.01 m in z-direction. The differences for the corners of the transport box are above average with 0.02 m which is probably due to the grooved surface of the box. R^2 for the correlation between DGPS and DEM is 0.99.

Tab. 2: Plant height and growths (m) ($t_0 - t_4$) according to cultivar and treatment. Shading in the last column indicates ranking of the amount of growth according to cultivar (dark = big, bright = small) (for definition of "selected data" see 2.4.).

cultivar		date	t_0	$t_1 - t_0$	$t_2 - t_1$	$t_2 - t_0$	$t_3 - t_2$	$t_3 - t_1$	$t_3 - t_0$	$t_4 - t_3$	$t_4 - t_2$	$t_4 - t_1$	$t_4 - t_0$
1	all data	treated	0.000	0.295	0.210	0.505	0.282	0.492	0.787	-0.045	0.237	0.447	0.742
2			0.000	0.293	0.219	0.511	0.289	0.508	0.800	-0.037	0.252	0.471	0.763
3			0.000	0.305	0.179	0.484	0.286	0.465	0.770	-0.093	0.193	0.372	0.677
4			0.000	0.308	0.203	0.511	0.316	0.520	0.828	-0.016	0.300	0.503	0.812
1		untreated	0.000	0.165	0.228	0.393	0.326	0.554	0.719	-0.103	0.222	0.450	0.616
2			0.000	0.173	0.236	0.409	0.370	0.606	0.780	-0.111	0.260	0.496	0.669
3			0.000	0.183	0.230	0.413	0.282	0.512	0.695	-0.092	0.190	0.421	0.604
4			0.000	0.185	0.231	0.416	0.335	0.566	0.751	-0.083	0.252	0.483	0.668
1	selected data	treated	0.000	0.295	0.210	0.505	0.228	0.437	0.732	0.004	0.232	0.442	0.737
2			0.000	0.293	0.219	0.511	0.267	0.485	0.778	-0.003	0.264	0.482	0.775
3			0.000	0.305	0.179	0.484	0.220	0.399	0.704	-0.020	0.200	0.379	0.684
4			0.000	0.308	0.203	0.511	0.309	0.513	0.821	0.001	0.311	0.514	0.822
1		untreated	0.000	0.165	0.228	0.393	no data				0.252	0.480	0.646
2			0.000	0.173	0.236	0.409					0.284	0.520	0.693
3			0.000	0.183	0.230	0.413					0.143	0.373	0.556
4			0.000	0.185	0.231	0.416					0.233	0.464	0.649

Tab. 3: Comparison of heights (m) measured by DGPS and pixel values of DEM for accuracy assessment.

DGPS	DEM	Difference
126.261	126.257004	0.003996
126.151	126.164001	-0.013001
126.181	126.166000	0.015000
126.219	126.224998	-0.005998
126.529	126.504997	0.024003
126.409	126.393997	0.015003
126.713	126.728996	-0.015996
126.730	126.704002	0.025998
126.734	126.707001	0.026999
126.716	126.691002	0.024998
	mean	0.0101002

4 Discussion and Conclusion

The study area, experiment design and validation results underlined the suitability of stereo images from optical cameras mounted on UAV systems for crop growth monitoring. This enables DEM/CSM generation for agricultural purposes (HOFFMEISTER et al. 2010). Other campaigns like the ones by GRENZDÖRFFER et al. (2008), HUNT et al. (2010) and LELONG et al. (2008) already mentioned the great potential of UAVs in the field of agriculture.

The MK-Oktokopter by HiSystems GmbH low-cost platform produces competitive results to the often used Microdrone MD4-200, Falcon 8 (EISENBEISS & SAUERBIER 2011) and other UAVs (e. g. ABER et al. 2010, EISENBEISS et al. 2005, VALLET et al. 2011).

Still some improvements will be made in the future: the UAV-system will be equipped with a camera holder that enables pitch and roll compensation during the flight. This ensures the capture of images in nadir position during movement of the UAV-system. A camera with increased resolution will be used (Panasonic Lumix DMC GX1, 16 mio. pixel) in order to increase ground resolution. It can be triggered electrically which makes image acquisition more reliable compared to a mechanical trigger.

Size, design, texture and number of the GCPs were suitable for the study since they

could be clearly identified in the images. With increasing density and height of vegetation the visibility of the GCPs at the chosen placement was obstructed by plants in some cases. To enhance data quality GCPs will be placed in unobstructed positions. The accuracy of the GCPs could be slightly improved by using a total station as HARWIN & LUCIEER (2012) found out, but would make data collection more time consuming.

Flight planning including flight route generation and data acquisition points enabled capturing images of the whole study area. For t_3 , t_4 and t_5 weather conditions during data collection, mainly wind, influenced the quality of the CSMs. Generally weather conditions limit the applicability of a UAV-system for data collection.

The overlap of 50% between the images will be increased in the future in order to cover the study area from numerous positions leading to a greater variety of viewing perspectives. HAALA & ROTHERMEL (2012) used 80% overlap, stating that using additional stereo pairs enhances the point clouds, especially in previously occluded areas. Another study by HARTMANN et al. (2012) suggest 90% overlap leading to 0.01 m horizontal and 0.03 m vertical accuracy.

Different settings were tested in Agisoft PhotoScan showing that model quality increased with the amount of photos used for

model generation. This is also stated by ROBERTS et al. (2011). The number of photos taken during the flights will be increased in the future because higher accuracy is expected. The inclusion of photos that were discarded before due to insufficient sharpness, exposure or coverage of the area did not decrease the model quality but on the contrary led to increased model quality in some cases.

Dividing the model of the study area into two tiles led to datasets with manageable data size and provided the opportunity of model comparison. The comparison showed satisfying results for good quality data (e.g. t_2 , Fig. 6) with a mean difference of z -values of 0.02 m. An error of this magnitude corresponds to the results of the accuracy assessment which shows a mean error of 0.01 m. HARWIN & LUCIEER (2012) achieved an accuracy of 0.025 cm – 0.04 cm with a DGPS at a comparable flying height of 40 m – 50 m. Taking other sources of error into account like inaccuracies caused by moving plants during data acquisition or inaccuracy of the DGPS, the resulting CSMs enable plant growth monitoring with very high accuracy.

The comparison of plant heights derived from CSM and infield control surveys showed that for t_4 the range of values is twice as large in the CSM (0.42 m) compared to the infield control survey (0.21 m). This is mainly due to the underestimation of heights in the model especially in the southern part of the field where the untreated plots are located. In this part of the field the range of height values is about 0.06 m larger compared to the northern part of the field. The same is true for the mean height difference between CSM and infield control survey compared to treated plots. Two possible sources of error might account for those differences: The CSMs become more complex with progressing phenology as differences in plant heights increase. This makes modelling difficult as only one viewing perspective (nadir) was chosen and some areas might not have been covered sufficiently. HARWIN & LUCIEER (2012) suggest data collection from different perspectives. This would further increase the time required for data collection. Continuous acquisition of nadir images using the electrical trigger could address this problem avoiding time consuming measurements.

A second reason is the accuracy of infield control surveys. Determining average plant height is difficult due to high variability of heights in a plot and the fact that plants are moving by wind. A higher number of samples for the control surveys could help to increase accuracy.

Fig. 6 shows that with the method presented in this study it is possible to derive multi-temporal CSMs similar to the concept presented in Fig. 1. The transferability of the concept used for a TLS (HOFFMEISTER et al. 2010) to a different platform, the UAV, is possible. The partial models show a similar surface profile, if the quality of the raw data is sufficient (problematic are: t_3 , t_4 and t_5).

The statistical analysis of the models showed detectable differences between growth according to the cultivar and the treatment. When plants were treated with fungicides, the overall plant height was 15% higher compared to untreated plants. The plant heights of cultivar 3 were 14% lower compared to better growing cultivars 2 and 4.

5 Outlook

In the planned field campaign of 2013, the results obtained from the CSM analysis will be combined with data captured by a multispectral (Tetracam's MiniMCA) and a thermal sensor (NEC F30IS) (BENDIG et al. 2012). Thus additional spectral and thermal patterns will be analysed between plant height, which is linked to biomass, vegetation indices, derived from multispectral data (HUNT et al. 2010), and plant temperature (BERNI et al. 2009), derived from thermal data. Additionally, the approach will be applied to different crops with varying growth patterns like rice, sugar beet and maize in 2013 in order to investigate the transferability of the concept of multi-temporal CSMs.

Acknowledgements

The authors acknowledge the funding of the CROP.SENSE.net project in the context of Ziel 2-Programms NRW 2007-2013 "Regionale Wettbewerbsfähigkeit und Beschäftigung

(EFRE)'' by the Ministry for Innovation, Science and Research (MIWF) of the state North Rhine Westphalia (NRW) and European Union Funds for regional development (EFRE) (005-1103-0018).

In addition, we thank the Institute for Agricultural Plants and Resource Protection (INRES) – Horticultural Science of University of Bonn (Prof. Dr. GEORG NOGA, Dr. MAURICIO HUNSCHE and GEORG LEUFEN), for providing the experiment field.

We would like to thank Dr. KAI SCHMIDT and the Julius-Kühn-Institute (JKI), branch office Elsdorf, for providing the test site for the accuracy assessment.

References

- ASCOS PED, 2010: Der präzise Echtzeitdienst. – http://www.ascos.de/uploads/tx_y3downloads/Produktblatt_PED_2010.pdf (10.1.2013).
- ABER, J.S., MARZLOFF, I. & RIES, J.B., 2010: Small-Format Aerial Photography. Principles, Techniques and Geoscience Applications. – First Edition, 266 p., Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- AGISOFT, 2013: <http://www.agisoft.ru> (8.1.2013).
- BENDIG, J., BOLTEN, A. & BARETH, G., 2012: Introducing a low-cost Mini-UAV for thermal- and multispectral-imaging. – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **XXXIX** (B1): 345–349.
- BERNI, J.A.J., ZARCO-TEJADA, P.J., SUÁREZ, L. & FERRERES, E., 2009: Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. – IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **47** (3): 722–738.
- DE REU, J., PLETS, G., VERHOEVEN, G., DE SMEDT, PH., BATS, M., CHERRETTÉ, B., DE MAEYER, W., DECONYNCK, J., HERREMANS, D., LALOO, P., VAN MEIRVENNE, M. & DE CLERQ, W., 2013: Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage. – Journal of Archaeological Science **40**: 1108–1121.
- EISENBEISS, H., SAUERBIER, M., ZHANG, L. & GRÜN A., 2005: Mit dem Modellhelikopter über Pinchango Alto. – Géomatique Suisse **9**: 510–515.
- EISENBEISS, H., 2009: UAV Photogrammetry. – IGP Mitteilungen Nr. 105, Zürich, Schweiz.
- EISENBEISS, H. & SAUERBIER, M., 2011: Investigation of UAV systems and flight modes for photogrammetric applications. – The Photogrammetric Record **26** (136): 400–421.
- GRENZDÖRFFER, G.J., ENGEL, A. & TEICHERT, B., 2008: The photogrammetric potential of low-cost UAVs in forestry and agriculture. – The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **XXXVII** (B1): 1207–1214.
- HAALA, N. & ROTHERMEL, M., 2012: Dense Multi-stereo matching for high quality digital elevation models. – PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation **2012** (4): 331–343.
- HANSEN, P.M. & SCHJOERRING, J.K., 2003: Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. – Remote Sensing of Environment **86** (4): 542–553.
- HARWIN, S. & LUCIEER, A., 2012: Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery. – Remote Sensing **4**: 1573–1599.
- HARTMANN, W., TILCH, S., EISENBEISS, H. & SCHINDLER, K., 2012: Determination of the UAV position by automatic processing of thermal images. – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **XXXIX** (B6): 111–116.
- HISYSTEMS GMBH, 2013: <http://www.hisystems.de> (8.1.2013).
- HOFFMEISTER, D., BOLTEN, A., CURDT, C., WALDHOF, G. & BARETH, G., 2010: High resolution Crop Surface Models (CSM) and Crop Volume Models (CVM) on field level by terrestrial laserscanning. – SPIE Proceedings **7840**.
- HUNT, E.R., HIVELY, W.D., FUJIKAWA, S.J., LINDEN, D.S., DAUGHTRY, C.S.T. & MCCARTY, G.W., 2010: Acquisition of NIR-green-blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring. – Remote Sensing **2**: 290–305.
- LELONG, C.C.D., BURGER, P., JUBELIN, G., ROUX, B., LABBÉ, S. & BARET, F., 2008: Assessment of unmanned aerial vehicles imagery for quantitative monitoring of wheat crop in small plots. – Sensors **8**: 3557–3585.
- MIKROKOPTER, 2013a: NaviCtrl V2.0. – http://www.mikrokoetter.de/ucwiki/NaviCtrl_2.0 (8.1.2013).
- MIKROKOPTER, 2013b: MikroKopterTool-OSD. – <http://www.mikrokoetter.de/ucwiki/mikrokoettertool-osd> (8.1.2013).
- MULLA, D.J., 2012: Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. – Biosystems Engineering **XXX**: 1–14.
- NEITZEL, F. & KLONOWSKI, J., 2011: Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system. – International Archives of the Photogrammetry, Remote

- Sensing and Spatial Information Sciences **XXXVIII-1** (C22): 1–6.
- PANASONIC, 2013: <http://94.23.55.209/index.php/Cameras/Camera-Sensor-Database/Panasonic/Lumix-DMC-GF3> (8.1.2013).
- PERKO, R., RAGGAM, H., GUTJAHR, K. & SCHARDT, M., 2010: Analysis of 3D Forest Canopy Height Models Resulting from Stereo-Radargrammetric Processing of TerraSAR-X Images. – Remote Sensing for Science, Education, and Natural and Cultural Heritage: 537–545.
- ROBERTS, R., SINHA, S.N., SZELISKI, R. & STEEDLY, D., 2011: Structure from motion for scenes with large duplicate structures. – IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition: 3137–3144.
- ST-ONGE, B., VEGA, C., FOURNIER, R.A. & HU, Y., 2008: Mapping canopy height using a combination of digital stereo-photogrammetry and lidar. – International Journal of Remote Sensing **29** (11): 3343–3364.
- SZELISKI, R., 2010: Computer Vision: Algorithms and Applications. – First Edition, 812 p., Springer, London, UK.
- THENKABAIL, P.S., SMITH, R.B. & PAUW, E.D., 2000: Hyperspectral vegetation indices and their relationship with agricultural crop characteristics. – Remote Sensing of Environment **71** (2): 152–182.
- VALLET, J., PANISSOD, F., STRECHA, C. & TRACOL, M., 2011: Photogrammetric performance of an ultra light weight singlet “UAV”. – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **XXXVIII-1** (C22): 1–6.
- VERHOEVEN, G., 2011: Taking computer vision aloft – Archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with PhotoScan. – Archaeological Prospection **18**: 67–73.
- VERHOEVEN, G., DONEUS, M., BRIESE, CH. & VERMEULEN, F., 2012: Mapping by matching: a computer vision-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs. – Journal of Archaeological Science **39**: 2060–2070.

Address of the Authors:

JULIANE BENDIG, Dr. ANDREAS BOLTEN, Prof. Dr. GEORG BARETH, Institute of Geography, GIS & RS Group, University of Cologne, Albertus-Magnus-Platz, D-50923 Köln, Tel.: +49-221-470-6265, Fax: +49-221-470-8838, e-mail: {juliane.bendig}{andreas.bolten}{g.bareth}@uni-koeln.de

Manuskript eingereicht: Februar 2013

Angenommen: Juni 2013



Konzeption und Implementierung einer fallspezifischen Unsicherheitskette im Rahmen fernerkundlicher Auswertungen

JOCHEN SCHIEWE & CHRISTOPH KINKELDEY, Hamburg

Keywords: uncertainty modeling, uncertainty visualization, classification

Zusammenfassung: Dieser Beitrag behandelt alternative bzw. innovative Ansätze für die Modellierung und Visualisierung von Unsicherheiten, die im Rahmen von fernerkundlichen Auswertungen entstehen. Hinsichtlich der Modellierung sollen räumlich und thematisch differenziertere Angaben als die häufig nur verwendeten *overall accuracy* oder *Kappa-Index* erzeugt werden. Hierzu wird eine erweiterte Kategorisierung der Unsicherheiten hinsichtlich des Trägers der Unsicherheit (flächenhaftes Objekt, Objektgrenze) sowie der Herkunft der Unsicherheitsinformationen (Vergleich mit *ground truth*, Güte der Klassenzuweisung, Bewertung mit Hilfe von Zusatzwissen) vorgeschlagen. Auf diese generellen Unsicherheitstypen aufbauend werden angepasste Visualisierungsformen (*Noise Annotation Lines* bzw. *Ghost Lines*) vorgestellt. Schließlich wird die Implementierung dieser Konzepte bis hin zur Nutzbarkeit in einem Webportal, d.h. bis zum Schließen einer „Unsicherheitskette“, im Rahmen des Projektes „KLIWAS“ beschrieben.

Summary: *Conception and Implementation of a Case Specific Uncertainty Chain in the processing of Remote Sensing Scenes.* This contribution deals with alternative and innovative approaches for modeling and visualizing uncertainties that arise in the context of a remote sensing analysis. Concerning the modeling stage, measures will be generated that yield more spatially and thematically differentiated information in contrast to the commonly used *overall accuracy* and *Kappa-Index*. For this purpose, we propose an expanded categorization of uncertainties related to the carriers of uncertainty (polygonal object, object boundary) and the origin of uncertainty information (comparison with *ground truth*, quality of class assignment, evaluation by means of a priori expert knowledge). Based on these general uncertainty types we present adapted visualization forms (*Noise Annotation Lines* and *Ghost Lines*, respectively). Finally, the implementation of these concepts up to the utilization in a web portal, i.e. towards the closing of the “uncertainty chain”, as part of the project “KLIWAS” is described.

1 Einführung

Die **Daten- und Modellqualitäten** geben die Übereinstimmung zwischen der realen Welt und den erfassten bzw. bearbeiteten (Fernerkundungs-)Daten wieder. Eine Reihe von Normen und Standards, z. B. ISO 19113, 19115, 19138, 14825, ENV 12656 oder die Vorgaben des US-amerikanischen Federal Geographic Data Committee, beschreiben die Qualitätsbegriffe näher. Diese reichen allerdings nicht aus, um alle denkbaren Diskrepanzen darzustellen. So gibt es weitere teilweise unbekannte Parameter wie die inhärente Unsicherheit

in der realen Welt, die Beschränkung des menschlichen Wissens in der Erkenntnis der realen Welt oder die Grenzen der Messtechnik zum Erfassen räumlicher Daten. Im Kontext der Auswertung von Fernerkundungsszenen fehlt beispielsweise häufig das objektive Wissen über bestimmte atmosphärische Aufnahmebedingungen, die eine Verfälschung der empfangenen Reflexionen verursachen können, oder über die tatsächliche Entwicklung der Landbedeckung, die sich zwischen zwei diskreten Aufnahmezeitpunkten im Rahmen einer Veränderungsanalyse ergeben hat.

Daher ist es angebracht, den übergeordneten Begriff der **Unsicherheiten** zu verwenden, der die Gesamtheit aller Effekte inkludiert (HUNTER & GOODCHILD 1993, ZHANG & GOODCHILD 2002). Im Kontext der thematischen Auswertung von Fernerkundungsszenen geschieht die Beschreibung bzw. **Modellierung** der Unsicherheiten aus pragmatischen Gründen sehr häufig nur a posteriori und summarisch, z. B. durch Angaben der *overall accuracy* oder des *Kappa-Indexes*, die jeweils durch einen Vergleich mit Referenzdaten (*ground truth*) bestimmt werden. Die **Vermittlung** dieser oder auch detaillierterer Informationen erfolgt oft nur rudimentär oder mit ungeeigneten (kartographischen) Mitteln. Diese Einschränkungen, die in Abschnitt 2 näher beschrieben werden, führen u. a. dazu, dass die **Nutzung** dieser Unsicherheitsinformationen bei der Ableitung neuen Wissens oder Entscheidungen nach unseren Beobachtungen (zu) selten stattfindet. Einige Studien haben jedoch Indizien dafür geliefert, dass Entscheidungen durch die Kommunikation von Unsicherheiten zuverlässiger werden können (EVANS 1997, LEITNER & BUTTENFIELD 2000, DEITRICK & EDSALL 2006). Auch die Sensitivitätsanalysen von PONTIUS & LIPPITT (2006) stellen ein Argument zur Nutzung von Unsicherheitsinformationen dar: Hierbei stellten die Autoren fest, dass die Hälfte der erkannten "Veränderungen" aus zwei klassifizierten Bildern durch Klassifizierungsfehler verursacht wurden, wobei die Gesamtklassifizierungsgüte jeweils einen – für die Klassifizierung von Fernerkundungsdaten durchaus typischen – Wert von 91% aufwies.

Folglich besteht Forschungs- und Entwicklungsbedarf bei der Modellierung, Vermittlung und Nutzung von Unsicherheitsinformationen – und speziell in der Verknüpfung der i. d. R. isoliert betrachteten Arbeitsschritte. Aus diesem Grund soll hier auch der Begriff der *Unsicherheitskette* propagiert werden, um die Bedeutung des Zusammenwirkens dieser Schritte zu verdeutlichen.

In diesem Kontext verfolgt dieser Beitrag zwei übergeordnete Ziele: Zum einen sollen basierend auf bisherigen Arbeiten und Erkenntnissen (Abschnitt 2) alternative bzw. innovative Ansätze für die Teilschritte der Modellierung und Vermittlung vorgestellt werden

(Abschnitt 3). Hierbei zielen wir auf eine primär *qualitative* Nutzung, z. B. zur Erkennung von Mustern oder Inhomogenitäten, ab, während die quantitative Verwertung nicht näher behandelt wird.

Zum anderen soll aufbauend auf diese konzeptionellen Arbeiten die Implementierung einer konkreten Unsicherheitskette für den Anwendungsfall einer fernerkundlichen Auswertung realisiert werden (Abschnitt 4). Die generalisierten Erkenntnisse aus diesem Vorhaben hinsichtlich Vorgehensweise, Aufwand und Übertragbarkeit werden abschließend zusammengefasst (Abschnitt 5).

2 Bisherige Arbeiten

2.1 Modellierung

Modelle zur Beschreibung von qualitativen und quantitativen Unsicherheiten sind in der Regel nicht allgemeingültig und müssen für konkrete Anwendungen angepasst werden (CAERS 2011, CONGALTON & GREEN 2009, EHLERS & SHI 1996). Im Kontext der Fernerkundung spielen vor allem Modelle für thematische und geometrische Unsicherheiten sowie kombinierte Verfahren wichtige Rollen.

Thematische Unsicherheiten beschreiben die Übereinstimmung eines Attributwerts zu seinem Wert in der realen Welt (SHI 2010). Thematische Unsicherheiten können Fehler und Ungenauigkeiten umfassen, aber auch die Vagheit, z. B. bei der Definition von Landbedeckungsklassen, und Mehrdeutigkeit, z. B. aufgrund der Mischpixelproblematik.

Geometrische Unsicherheiten können als Unterschied zwischen der beschriebenen (2D- oder 3D-)Position eines Geoobjekts und der Position in der realen Welt aufgefasst werden (SHI 2010). Am häufigsten werden hierzu probabilistische Modelle verwendet, die die räumliche Verteilung von Fehler-Wahrscheinlichkeiten abbilden, z. B. das S-Band-Modell von SHI & EHLERS (1993). Zum anderen kommen Fuzzy-Logik-Modelle zum Einsatz, die sich vor allem zur Behandlung von Mehrdeutigkeit und Vagheit eignen, z. B. EDWARDS & LOWELL (1996).

Die beiden genannten Aspekte der thematischen und geometrischen Unsicherheiten

lassen sich nicht immer trennen. Daher gibt es auch **kombinierte Unsicherheitsmodelle**. Beispielsweise wurden im CLAIM-Projekt (Classification Assessment using an Integrated Method, KINKELDEY et al. 2010) Unsicherheiten in den Übergängen zwischen Geoobjekten mit Hilfe von Fuzzy Logic modelliert.

Bei der Auswertung von Fernerkundungsdaten liegt der Fokus im Allgemeinen auf der Angabe von summarischen, a posteriori Maßen, weil eine exakte Quantifizierung und Beschreibung der Fortpflanzung aufgrund der Komplexität sowie der vielfältigen Unsicherheitseinflüsse schwierig sind. Durch die summarische Angabe, z. B. durch Fehlermatrizen, *overall accuracy* oder *Kappa-Index* (CONGALTON 1991), gehen allerdings auch räumliche Bezüge bzw. geometrisch-thematische Zusammenhänge verloren, die für eine detaillierte Analyse von Interesse sein könnten.

2.2 Vermittlung

Die oben genannte Komplexität und der Anspruch einer räumlich differenzierten Modellierung der Unsicherheiten führen fast zwangsläufig zur Notwendigkeit der (karto-)graphischen Visualisierung zu Vermittlungszwecken. Auch wenn das Thema der Visualisierung von Unsicherheiten nur nebenläufig behandelt wurde (MAC EACHREN et al. 2012), wurden in den letzten Jahren in der Kartographie oder wissenschaftlichen Visualisierung einige Typologien und Kategorisierungen, z. B. durch BRODLIE et al. (2012), Methoden, z. B. durch SKEELS et al. (2009), und Studien vorgestellt, z. B. durch BOUKHELIFA et al. (2012) und ROTH (2009). Grundsätzlich sind bei der Visualisierung zwei Aspekte zu berücksichtigen – zum einen das graphische Zusammenspiel der Darstellung mit dem eigentlichen Karteninhalt, z. B. der erzeugten Landbedeckungs-Klassifizierung, zum anderen der Einsatz einer passenden graphischen Kodierung.

Hinsichtlich des **graphischen Zusammenspiels mit dem Karteninhalt** werden drei Varianten unterschieden: Bei der *separaten Darstellung* wird zusätzlich zur eigentlichen Karte eine weitere angezeigt, die die zugehörigen Unsicherheiten visualisiert. Diese

Methode erfordert viele Blickbewegungen (Sakkaden), die einen exakten Vergleich von identischen Positionen oder Bereichen in verschiedenen Fenstern sowie die Behaltensleistungen erschweren. *Sequenzielle Darstellungen* bestehen z. B. in der abwechselnden Darbietung von Karte und Unsicherheitskarte in einem Fenster oder in einer aufwändigeren Animation. Diese Variante hat den Nachteil, dass die einzelnen Repräsentationen nur kurz und vor allem nicht gleichzeitig dargestellt werden, so dass mentale Vergleiche mit gerade nicht sichtbaren Informationen hergestellt werden müssen (ANDRIENKO 2005). Die *kombinierte Darstellung* besteht in der Verschmelzung der zugrunde liegenden Geodaten und der Angabe zu ihren Unsicherheiten in einem Fenster. Hierbei gehen oft Informationen, z. B. durch Überdeckungen oder Generalisierungen, verloren.

Im Hinblick auf die eigentliche **graphische Kodierung der Unsicherheitsinformationen** müssen intuitive und gut lesbare „Metaphern“ gefunden werden (GERSHON 1998). Hierzu geben VAN DER WEL et al. (1994) einen Überblick, der geeignete Zuordnungen von graphischen Variablen, z. B. Größe, Farbe oder Textur, zu verschiedenen Unsicherheitsarten, z. B. geometrische und thematische Unsicherheiten, und Merkmalsskalierungen (nominal, ordinal, intervall, ratio) beschreibt. Weitere Typologien zur Unsicherheitskodierung geben beispielsweise PANG (2001), MAC EACHREN et al. (2005) oder SCHIEWE (2010). MAC EACHREN et al. (2012) untersuchen in einer empirischen Studie die Intuitivität sowie die Genauigkeit der Schätzung von Unsicherheiten auf Basis verschiedener abstrakter und bildhafter Darstellungen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass es weder eine allumfassende Methode, noch eine allgemein akzeptierte Typologie zur Repräsentation von Unsicherheiten gibt.

3 Weiterentwicklung von Methoden

3.1 Modellierung

Im Folgenden besteht das übergeordnete Ziel in einer räumlich und zeitlich differenzierten Beschreibung der Unsicherheiten bei der Klassifizierung von Fernerkundungsdaten, um eine umfassendere Beschreibung sowie tiefergehende Ursachenanalyse zu ermöglichen.

Abb. 1 fasst die im Folgenden aufgeführten Unsicherheitsmaße zusammen. Hierbei wird zuerst zwischen den **Trägern der Unsicherheit** (flächenhaftes Objekt und Objektgrenze) unterschieden. Die klassische Trennung zwischen thematischer und geometrischer Unsicherheit wird hier mit Absicht nicht verfolgt, da diese Typen in der Regel eine wechselseitige Wirkung aufweisen. Z. B. zieht eine sehr große Unsicherheit in der Klassenzuweisung auch eine Unsicherheit der Grenze nach sich. Werden Unsicherheiten der Objektgrenzen betrachtet, müssen diese in der Regel entsprechend ihrer Nachbarschaften zerlegt und je nach Klassenkombination die jeweiligen Teilgrenzen separat behandelt werden (Abb. 2).

Der übliche Weg zur Unsicherheitsbeschreibung für die thematische Objektklassifizierung ist die Ableitung von **Maßen aus dem Vergleich** des Klassifizierungsergebnisses mit **ground-truth-Daten** (CONGALTON 1991). Diese Maße beziehen sich zwar auf einzelne Merkmalsträger (Pixel, Regionen, Objekte), in der Regel findet aber eine Aggregation

bis hin zu einer Kennzahl für die Gesamtszene (*overall accuracy*, *Kappa-Index*) statt. Ein Problem hierbei ist häufig das Fehlen einer geeigneten *ground truth* für die beobachteten Fernerkundungsdaten, die aufgrund der verbesserten räumlichen, spektralen und radiometrischen Auflösungen prinzipiell auch verbesserte Referenzdaten erfordern. Außerdem erlaubt diese summarische Betrachtung keine Differenzierung nach verschiedenen Arten der Unsicherheiten. Beispielsweise kann der Anteil, der durch den eigentlichen Klassifizierungsprozess entsteht, nicht isoliert betrachtet werden.

Ein alternativer Weg zur Beschreibung der Objektklassifizierung (Thematik) ist ein **Maß der Klassenzuweisung**. Dieses beschreibt die innere Güte bei Anwendung eines Klassifizierungsalgorithmus – z. B. einen Wahrscheinlichkeitswert aus dem Maximum-Likelihood-Verfahren, einen Zugehörigkeitswert aus einer Fuzzy-Logic-Klassifizierung oder die Differenz zwischen der besten und zweitbesten Zuweisung. Die Klassenzuweisung erfolgt je nach Verfahren pixel- oder regionenbasiert, kann dann aber zu Objekten, Klassen oder der Gesamtszene aggregiert werden, z. B. über den Mittel- oder Minimalwert der Zuweisungsgüte.

Sowohl die Maße aus dem Vergleich mit *ground-truth*-Daten, als auch diejenigen, die auf der Klassenzuweisung basieren, sind in unterschiedlicher Tiefe in Software-Produkten implementiert worden. Eine recht große Auswahl bietet z. B. *Trimble eCognition®* (TRIMBLE 2013, SCHIEWE & GÄHLER 2006) mit



Abb. 1: Übersicht der Unsicherheitsmaße.

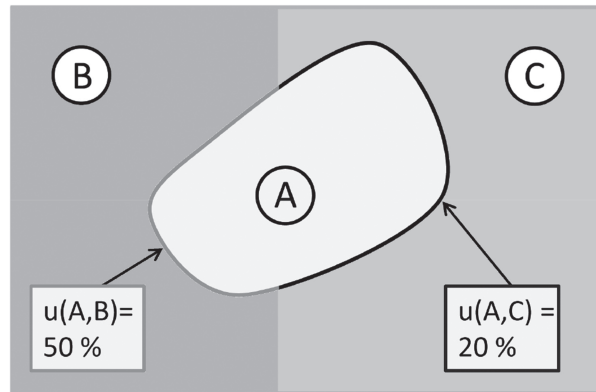


Abb. 2: Zerlegung der Objektgrenze in Teilgrenzen (links: Klassen A und B, rechts: Klassen A und C) und Zuweisung von Grenzunsicherheiten.

den Ansätzen „Error matrix based on TTA mask“ und „Error matrix based on samples“ (Vergleich mit *ground-truth*) sowie „Classification stability“ und „Best classification result“ (Berücksichtigung von Zugehörigkeitswerten der fuzzy-logic-Zuweisung).

Zu den bisher vorgestellten Kennzahlen werden im Folgenden zusätzliche Maße vorgestellt, die unabhängig von der eigentlichen Klassifizierung und basierend auf Expertenwissen ermittelt werden können:

- **Maß der spektralen Ähnlichkeit:** Je spektral ähnlicher ein Objekt zu seinen Nachbarobjekten ist, desto unsicherer sind sowohl die Klassenzuweisung zum Objekt als auch die Grenzziehung. Die Ähnlichkeit zwischen zwei *Objekten* O_A und O_B erfolgt auf Basis einer anwendungsspezifischen Beschreibung der Ähnlichkeit zwischen den zugehörigen *Klassen* A und B.
- **Maß der zeitlichen Variabilität:** Klassen, deren Erscheinung in der Natur, in Fernerkundungsbildern sich über die Zeit oft und/oder stark ändern kann, weisen eine höhere Unsicherheit bei der Klassifizierung und dementsprechend in der Grenzscharfe auf.
- **Maß der geometrischen Variabilität:** Klassen, deren Vorkommen in Größe und Form stark variieren, weisen eine höhere Unsicherheit bei der Klassifizierung und dementsprechend in der Grenzziehung auf.
- **Maß der Grenzunschärfe:** Ist die Grenze zwischen zwei Klassen A und B in der

Natur bereits schwer zu beschreiben bzw. unscharf, z. B. zwischen Wald und Wiese, wird durch diese Unschärfe nicht nur die Lage der Grenze, sondern zu einem gewissen Grad auch die Klassifizierung beeinflusst.

- **Maß der Nachbarschaftswahrscheinlichkeit:** Ist die Nachbarschaft zweier Klassen A und B sehr selten, sind sowohl die Zuweisung zu den Objekten O_A und O_B , als auch die Grenzziehung zwischen diesen beiden als unsicher zu bezeichnen.

Diese Maße setzen ein domänenspezifisches Expertenwissen voraus und lassen sich i. d. R. auf einer ordinalen Skala beschreiben. Eine anwendungsspezifische Anwendung dieser Maße wird in Abschnitt 4.2 vorgestellt.

Alle bisher genannten Maße geben primär Aufschluss über die *thematische Korrektheit* der Zuordnung von Objekt-Zuweisungen bzw. der zugehörigen Attribute. Andere, z. B. in der ISO 19113 genannten Komponenten der Datenqualität, werden dabei indirekt betrachtet. So lässt sich die *Vollständigkeit*, also die Präsenz oder das Fehlen von Objekten oder Attributen, über eine summarische Bewertung einer Konfusionsmatrix nachvollziehen. Dagegen können Verletzungen der logischen *Konsistenz*, die aus Widersprüchen der konzeptionellen und logischen Datenstrukturen bzw. der Definition des Objektmodells entstehen, durch die vorgestellten a posteriori-Maße nicht ohne weiteres aufgedeckt werden.

3.2 Visualisierung

Im Kontext der Vermittlung bzw. Visualisierung sollen im Folgenden Methoden vorgestellt werden, die in der Lage sind, den erweiterten Satz der oben dargestellten Unsicherheitsmaße in einer möglichst homogenen sowie übertragbaren Art und Weise zu behandeln. Hierzu wird entsprechend der Strukturierung in Abb. 2 zwischen den Maßen unterschieden, die sich auf die eigentliche Unsicherheit der Objektklasse sowie auf die Objekt-(Teil-)Grenzen beziehen.

Für die **Darstellung der thematischen Objektunsicherheiten** wird die kombinierte Methode der *Noise Annotation Lines* propagiert, die im Umfeld der wissenschaftlichen Visualisierung erstmals von CEDILNIK & RHEINGANS (2000) vorgestellt, danach aber kaum weiterverfolgt wurde. Hierzu wird an jedem Punkt eines regelmäßigen Gitters ein Unsicherheitswert in Form von Rauschen visualisiert, wobei die Strichbreite proportional zur Größe der Unsicherheit gewählt wird (Abb. 3). Vorteile dieser Darstellungsmethode sind die Verwendung einer Metapher (Rauschen ~ Unsicherheiten) und eine relativ geringe Überdeckung der Karteninhalte. Zum anderen kann sie auf verschiedene Kartenmaßstäbe durch Wahl der Gitterweite angepasst werden. Eine ausführliche Beschreibung zur Generierung sowie eine Bewertung der Gebrauchstauglichkeit der Methode der Annotation Lines geben KINKELDEY & SCHIEWE (2012).

Im Zusammenhang mit der Darstellung der **Unsicherheiten im Grenzverlauf** verglichen BOUKHELIFA et al. (2012) in einer Nutzerstudie

die Intuitivität und Gebrauchstauglichkeit vier verschiedener Techniken: Unscharfe, gestrichelte und unregelmäßige Linien sowie solche, die in verschiedenen Graustufen dargestellt werden. Von den Probanden wurden die gestrichelten Linien subjektiv bevorzugt, wobei es keine Einschränkungen hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit gab. Ein Vorteil dieser als *Ghost Lines* bezeichneten Variante ist zudem, dass sie im Vergleich zu den anderen genannten Techniken eine geringere Überdeckung aufweisen.

4 Anwendung

4.1 Projekthintergrund

Die Umsetzung der in Abschnitt 3 dargestellten Konzepte zur Modellierung und Visualisierung von Unsicherheiten erfolgte im Vorhaben „Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen (KLIWAS)“, das durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) gefördert und die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) geleitet wurde.

Im Projekt 3.09 „Ästuarvegetation und Vorlandschutz“ wurde untersucht, wie sich Eigenschaften und Funktionen der gezeitenbeeinflussten Vegetation im Elbe- und Weser-Ästuar klimabedingt verändern. Hierzu sollte eine Kombination von Felduntersuchungen und Auswertungen von Fernerkundungsdaten zu einer zeitnahen und effektiven Erfassung der großflächigen Röhrichtflächen beitragen.

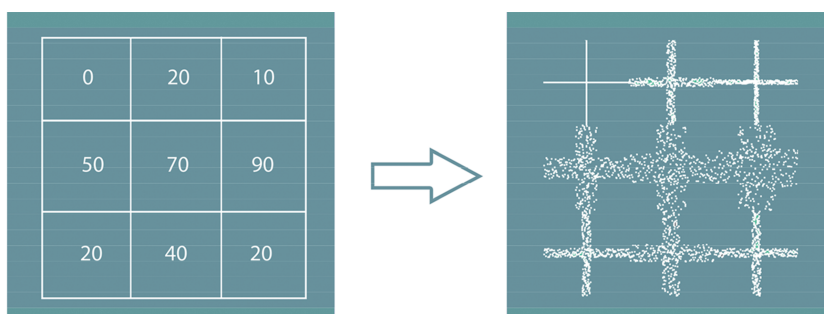


Abb. 3: Noise Annotation Lines: Unsicherheitswerte (links, in Prozent) werden durch ein „Rauschgitter“ (rechts) repräsentiert.

Im Teilprojekt „Querschnittsaufgabe Fernerkundung“ wurden zwei Sensoren zur Erfassung von unterschiedlichen Vorlandbereichen innerhalb des Elbe-Ästuars von jeweils ca. 400 ha eingesetzt: An der TU Berlin (BAHLS & KLEINSCHMIT 2012) wurden Daten des satellitengestützten Systems RapidEye und an der Universität Bonn (FAUDE & SCHMIDTLEIN 2012) Szenen des hyperspektralen flugzeuggestützten Scanners AISA verwendet. Um die Unsicherheiten der abgeleiteten Klassifizierungen und Veränderungsanalysen besser beurteilen zu können, befasste sich eine Arbeitsgruppe der HafenCity Universität Hamburg (KINKELDEY & SCHIEWE 2013) mit der Modellierung und Visualisierung der auftretenden Unsicherheiten. Um in diesem Kontext die Anforderungen und Wünsche der potenziellen Fachnutzer zu berücksichtigen, wurden in einer a priori Anforderungsanalyse elementare Kenntnisse und Einschätzungen zu Themen wie notwendige Karteninhalte und -interaktionen sowie Bedeutung von Unsicherheitsinformationen abgefragt. Das notwendige Expertenwissen speziell zur Modellierung der Unsicherheiten wurde durch die Projektpartner eingebracht.

4.2 Modellierung

Aufgrund der gegebenen Rahmenbedingungen in diesem Anwendungsprojekt, z. B. eine zu geringe Zahl von *ground-truth*-Mes-

sungen, konnte nur eine Auswahl der in Abschnitt 3.2 skizzierten Unsicherheitsmaße implementiert werden. Solche Einschränkungen sind aber durchaus als typisch anzusehen. Die Existenz einer Vielzahl von Optionen ist umso wichtiger.

Als **Maße der Klassenzuweisung** wurden die pixelbezogenen Werte aus den sogenannten *Rule Images* aus der Klassifizierung der AISA Eagle-Daten mit dem Random-Forest-Klassifikator (Universität Bonn) sowie der objektbezogenen Klassenzugehörigkeiten aus der Klassifizierung der RapidEye-Daten mit einem Maximum-Likelihood-Klassifikator (TU Berlin) herangezogen.

Für die aus Expertenwissen abgeleiteten Maße wurden nach Diskussion mit Vegetationsexperten die Merkmale der zeitlichen und geometrischen Variabilität aufgrund fehlender Eindeutigkeiten im gegebenen Klassifizierungsschema nicht berücksichtigt. Für die drei verbleibenden Maße wurden folgende ordinale Skalen festgelegt:

- **Maß der spektralen Ähnlichkeit:** absolut unähnlich, teilweise ähnlich, ähnlich, sehr ähnlich, identisch;
- **Maß der Nachbarschaftswahrscheinlichkeit:** sehr häufig, häufig, indifferent, selten, sehr selten;
- **Maß der Grenzscharfe:** sehr unscharf, unscharf, scharf.

Auf dieser Basis wurden Matrizen aufgestellt, in denen diese Maße klassenpaarweise definiert wurden. Abb. 4 zeigt ein Beispiel

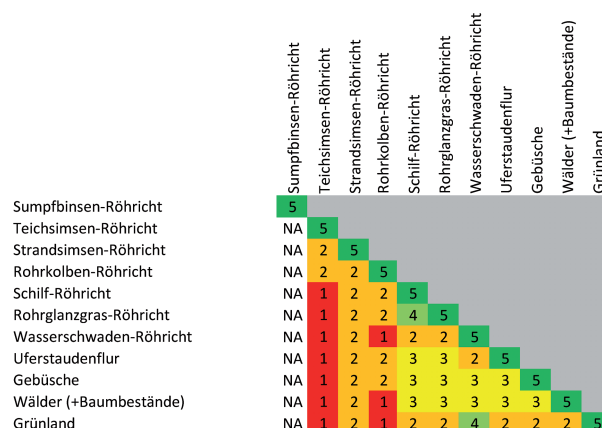


Abb. 4: Ausschnitt aus einer Unsicherheitsmatrix, die die spektrale Ähnlichkeit zwischen gegebenen Klassen beschreibt und aus Expertenwissen abgeleitet wurde.

hierfür. Die angesprochene Komplexität sowie heterogene Korrelationen zwischen diesen Maßen erlaubten es nicht, eine aussagekräftige, zusammenfassende Kenngröße zu ermitteln. Stattdessen erfolgt die Betrachtung der Unsicherheiten weiterhin getrennt.

4.3 Visualisierung

Für die Darstellung der verschiedenen **Maße der Objekt-Unsicherheiten** (Abb. 2) wurde die kombinierte Darstellung der *Noise Annotation Lines* (Abschnitt 3.2) gewählt. Je nach Verfahren kann die Darstellung einen konstanten Wert für jedes Objekt oder aber auch für jeden Gitterpunkt umfassen. Um die Überdeckung gegenüber dem eigentlichen Karteninhalt, d. h., dem Klassifizierungsergebnis, so gering wie notwendig zu halten, wurden Tests mit verschiedenen Gitterweiten für verschiedene Maßstäbe durchgeführt. Abb. 5 zeigt eine exemplarische Realisierung.

Die geometrischen **Grenzunsicherheiten** der Biotopkartierung wurden durch *Ghost Lines* (Abschnitt 3.2) visualisiert, die die Strichelung der Teilgrenze je nach Unsicherheitswert variieren (Abb. 6).

4.4 Nutzbarmachung

Das propagierte Modell der Unsicherheitskette bedarf in erster Linie einen möglichst einfachen und schnellen Daten- bzw. Informationsfluss. Dieser wurde dadurch erreicht, dass für alle beschriebenen Unsicherheitsmaße insgesamt nur zwei unterschiedliche Visualisierungsformen (*Noise Annotation Lines* bzw. *Ghost Lines*) verwendet worden sind, die ihrerseits mit üblicher GIS-Software und selbst erstellten Java-Tools leicht generiert werden können. Der Quellcode für die beschriebenen Tools für die Erzeugung von Noise Annotation Lines und Ghost Lines ist unter LGPL-Lizenz verfügbar (KLIWAS 2013a).

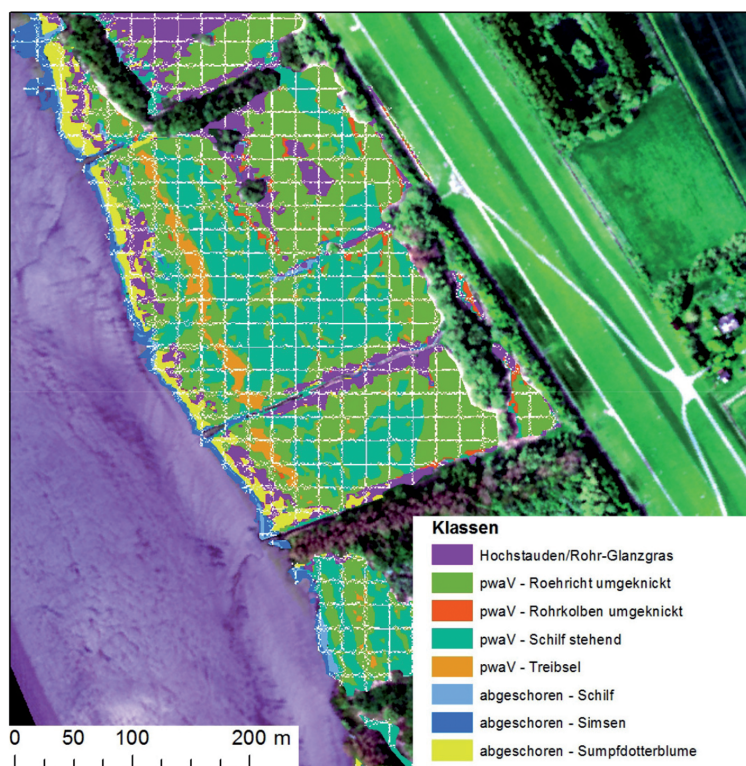


Abb. 5: Noise Annotation Lines zur Darstellung der Unsicherheit – Rasterweite 20 m.

In einem nächsten Schritt wurden die so erzeugten Unsicherheits-Layer zusammen mit den relevanten Geo- und Fachdaten, z. B. den Fernerkundungsbildern und Klassifizierungs-

ergebnissen, in das webbasierte Geoportal der Bundesanstalt für Gewässerkunde integriert (Abb. 7). Da dieses Portal die Esri ArcGIS-Server-Technologie nutzt, ist das Einstellen

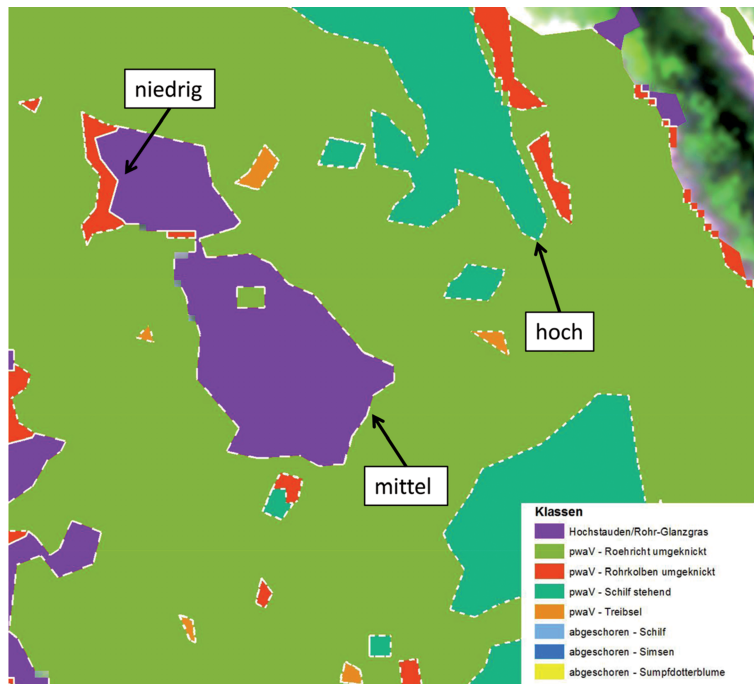


Abb. 6: Ghost Lines (gestrichelte Linien) repräsentieren die geometrische Unsicherheit einer jeden Teilgrenze der Klassifizierung.

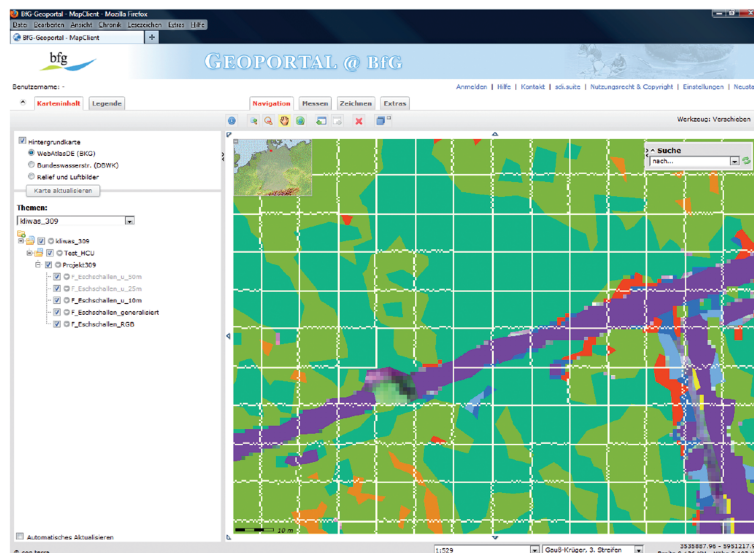


Abb. 7: Kombinierte Darstellung der Noise Annotation Lines im Geoportal@BfG (KLIWAS 2013b).

der Daten in Form eines ArcMap-Projekts und der zugehörigen Datei-Geodatenbank möglich. Es wurden Unsicherheits-Layer für mehrere Maßstabsbereiche erzeugt und integriert, um einen guten Kompromiss aus Überdeckung und Detailgrad der Information zu erreichen. Da die Unsicherheits-Layer über die OGC-konforme Web Mapping Service (WMS)-Schnittstelle zugänglich sind, können sie in andere Anwendungen importiert werden, die diese Schnittstelle unterstützen.

Aufgrund des Projektstatus konnte eine Evaluation der tatsächlichen Nutzung im Sinne der Gebrauchstauglichkeit und dem Ziel von verbesserten Entscheidungen durch Fachexperten noch nicht erfolgen. Aus den ersten qualitativen Reaktionen konnte aber geschlossen werden, dass das Rauschen der *Noise Annotation Lines* eine geeignete Metapher für Unsicherheiten zu sein scheint: Die Betrachter der Darstellung brauchten in der Regel keine Legende, um sich einen *qualitativen* Eindruck zu verschaffen bzw. relative Vergleiche zwischen Flächen korrekt durchzuführen. Es ist zu erwarten, dass sich die Darstellung weniger für das Ablesen *quantitativer* Unsicherheitswerte eignet.

Noch wichtiger erscheint der Eindruck, dass bei den Endnutzern durch die vorgeschaltete Anforderungsanalyse sowie die detaillierten kartographischen Darstellungsmöglichkeiten überhaupt eine Schärfung des Bewusstseins bzw. eine Steigerung der Akzeptanz für die Nutzung von Unsicherheiten erzielt wurde.

5 Fazit und Ausblick

Die **Modellierung von Unsicherheiten** ist ein hinsichtlich des Arbeitsaufwandes oft unterschätzter Schritt. Die starke Anwendungsabhängigkeit ergibt sich durch das Zusammenspiel des konkreten konzeptionellen Modells, z. B. des Katalogs der zu erfassenden Vegetationsarten, und der thematischen Detailtiefe, die aus vorhandenen (Fernerkundungs-)Daten abgeleitet werden kann. Eine einfache Übertragbarkeit auf andere Anwendungen ist kaum realisierbar. Die wissenschaftliche Erkenntnis aus diesem Beitrag bezieht sich daher auch vielmehr auf die Vorgehensweise als solche, die eine erweiterte Kategorisierung der Un-

sicherheiten hinsichtlich des Trägers der Unsicherheit, flächenhaftes Objekt, Objektgrenze, sowie der Herkunft, Vergleich mit *ground truth*, Güte der Klassenzuweisung, Bewertung mit Hilfe von Zusatzwissen, vorsieht. Weitere Forschung in diesem Bereich sollte eine noch stärker generalisierte Formulierung des Vorgehens erzielen, um Fachanwendern eine Handlungsanweisung zu ermöglichen.

Bezüglich der **Visualisierung von Unsicherheitsinformationen** gibt es keine standardisierten Methoden. Im Zusammenhang mit der anfangs propagierten Unsicherheitskette ist es andererseits aber notwendig, eine klare und wiedererkennbare Zuordnung zwischen den elementaren Typen von Unsicherheiten und ihrer visuellen Repräsentation zu gewährleisten. Mit den hier vorgestellten und implementierten Methoden der *Noise Annotation Lines* bzw. *Ghost Lines* ist dies für die getrennte Betrachtung von Unsicherheiten der Objektklasse bzw. der Objektgrenze realisiert worden. Die gute Erfassbarkeit von relativen Unsicherheiten, z. B. zwischen benachbarten Polygonen, konnte bereits nachgewiesen werden (KINKELDEY & SCHIEWE 2012). Derzeit sind von den Autoren Nutzerstudien zur *Noise-Annotation-Lines*-Methode in Arbeit, die weitere Erkenntnisse liefern werden. Die generelle Übertragbarkeit dieser Darstellungsformen auf andere Anwendungsfälle wird nach den bisherigen Erkenntnissen als unproblematisch eingeschätzt.

Im Zusammenhang mit der **Nutzung von Unsicherheitsinformationen** stellt die Integration der Visualisierungen in das BfG-Portal sicherlich nur einen praktischen Schritt dar. Dieser ermöglicht aber nun weitere Untersuchungen zur tatsächlichen Gebrauchstauglichkeit, z. B. durch systematische Befragungen von Nutzern, die das Webportal tatsächlich in ihre Arbeit eingebunden haben.

Die Übertragbarkeit des vorgestellten Arbeitsablaufes auf andere Anwendungsfälle ist grundsätzlich gewährleistet. Große Teile laufen dank der entwickelten Java-Tools automatisiert ab, so dass der Aufwand für die Behandlung der Unsicherheiten im Vergleich zur eigentlichen Klassifizierung als gering eingeschätzt wird. Es sind weitere Vorhaben in Planung, die das Konzept auf andere Anwendungen übertragen sollen.

Danksagungen

Die grundlegenden Arbeiten zu diesem Beitrag sind im Vorhaben „Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen (KLIWAS) – Teilprojekt 3.09 „Ästuarvegetation und Vorlandschutz“ – Querschnittsaufgabe Fernerkundung“ entstanden, das durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) gefördert und die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) geleitet wird. Wir danken den Projektpartnern, neben der BfG (Dipl.-Geoökologin MAIKE HEUNER, Dipl.-Geograph UWE SCHRÖDER) auch der Technischen Universität Berlin (Prof. BIRGIT KLEINSCHMIT) sowie der Rheinischen Friedrich Wilhelms-Universität Bonn (Prof. SEBASTIAN SCHMIDTLEIN), für einen reibungslosen Austausch von Daten, Informationen und Wissen.

Literatur

- ANDRIENKO, N., 2005: Impact of Data and Task Characteristics on Design of Spatio-Temporal Data Visualization Tools. – DYKES, J., MACEachREN, A.M. & KRAAK, M.-J. (eds.): *Exploring Geovisualization*: 201–222, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- BAHLS, A. & KLEINSCHMIT, B., 2012: Querschnittsaufgabe Fernerkundung. Konzeption für ein Langzeitmonitoring der gezeitenbeeinflussten Vegetation mit hochauflösenden Satellitendaten. – BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (Hrsg.): *KLIWAS Schriftenreihe 13/2012*, KLIWAS-Projekt 3.09, doi: 10.5675/Kliwas_13.2012_Fernerkundung_2, Koblenz.
- BRODLIE, K., ALLENDES OSORIO, R. & LOPES, A., 2012: A Review of Uncertainty in Data Visualization. – DILL, J., EARNSHAW, R., KASIK, D., VINCE, J. & CHUNG WONG, P. (eds.): *Expanding the Frontiers of Visual Analytics and Visualization*: 81–109, Springer, London.
- BOUKHELIFA, N., BEZERIANOS, A., ISENBERG, T. & FEKETE, J.-D., 2012: Evaluating Sketchy Lines for the Visualization of Qualitative Uncertainty. – *IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics* **18** (12): 2769–2778.
- CAERS, J., 2011: *Modeling uncertainty in the earth sciences*. – Wiley-Blackwell, Chichester, UK.
- CEDILNIK, A. & RHEINGANS, P., 2000: *Procedural Annotation of Uncertain Information*. – *IEEE Visualization IEEE* **2000**: 77–84, <http://www.cs.umbc.edu/~rheingan/pubs/grids00.pdf> (15.3.2013).
- CONGALTON, R.G., 1991: A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. – *Remote Sensing of Environment* **37** (1): 35–46.
- CONGALTON, R.G. & GREEN, K., 2009: *Assessing the accuracy of remotely sensed data. Principles and practices*. – CRC Press/Taylor & Francis, Boca Raton, FL, USA.
- DEITRICK, S. & EDSALL, R., 2006: The Influence of Uncertainty Visualization on Decision Making: An Empirical Evaluation. – *Progress in Spatial Data Handling*: 719–738, Springer, Berlin, Heidelberg.
- EDWARDS, G. & LOWELL, K.E., 1996: Modeling uncertainty in photointerpreted boundaries. – *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **62** (4): 377–390.
- EHLERS, M. & SHI, W., 1996: Error Modelling for Integrated GIS. – *Cartographica* **33** (1): 11–21.
- EVANS, B.J., 1997: Dynamic Display of Spatial Data Reliability: Does It Benefit the Map User? – *Computers & Geosciences* **23** (4): 409–442.
- FAUDE, U. & SCHMIDTLEIN, S., 2012: Querschnittsaufgabe Fernerkundung. Analyse von Störstellen, Röhricht- und Neophytenarten. – BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (Hrsg.): *KLIWAS Schriftenreihe 5/2012*, KLIWAS-Projekt 3.09, doi: 10.5675/KLIWAS_5.2012_Fernerkundung_1, Koblenz.
- GERSHON, N., 1998: Visualization of an imperfect World. – *IEEE Computer Graphics and Application* **18** (4): 43–45.
- HUNTER, G. & GOODCHILD, M.F., 1993: Managing uncertainty in spatial databases: Putting theory into practice. – *Annual Conference “Urban and Regional Information Systems Association”* **15**.
- KINKELDEY, C., TOMOWSKI, D., SCHIEWE, J. & EHLERS, M., 2010: Entwicklung alternativer Maße zur Bewertung der Güte klassifizierter Fernerkundungsszenen. – *GIS Science* **23** (1): 34–39.
- KINKELDEY, C. & SCHIEWE, J., 2012: Visualisierung thematischer Unsicherheiten mit „Noise Annotation Lines“. – *Kartographische Nachrichten* **62** (5): 241–249.
- KINKELDEY, C. & SCHIEWE, J., 2013: *Modellierung und Kommunikation von Unsicherheiten. Querschnittsaufgabe Fernerkundung. KLIWAS-Projekt 3.09*. – BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (Hrsg.): *KLIWAS Schriftenreihe 14/2013*, doi: 10.5675/Kliwas_14.2013_Fernerkundung_3, Koblenz.
- KLIWAS, 2013a: <http://code.google.com/p/kliwas/> (24.6.2013).
- KLIWAS, 2013b: <https://geoportal.bafg.de/> (24.6.2013).

- LEITNER, M. & BUTTENFIELD, B.P., 2000: Guidelines for the Display of Attribute Certainty. – *Cartography and Geographic Information Science* **27** (1): 3–14.
- MACÉACHREN, A.M., ROBINSON, A., HOPPER, S., GARDNER, S., MURRAY, R., GAHEGAN, M. & HETZLER, E., 2005: Visualizing Geospatial Information Uncertainty: What We Know and What We Need to Know. – *Cartography and Geographic Information Science* **32** (3): 139–160.
- MACÉACHREN, A.M., ROTH, R.E., O'BRIEN, J., LI, B., SWINGLEY, D. & GAHEGAN, M., 2012: Visual Semiotics & Uncertainty Visualization: An Empirical Study. – *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* **18** (12): 2496–2505.
- PANG, A., 2001: Visualizing Uncertainty in Geospatial Data. – Workshop on the Intersections between Geospatial Information and Information Technology, University of California, Santa Barbara, USA.
- PONTIUS, R.G. & LIPPITT, C.D., 2006: Can Error Explain Map Differences Over Time? – *Cartography and Geographic Information Science* **33** (2): 159–171.
- ROTH, R.E., 2009: A qualitative approach for understanding the role of geographic information uncertainty during decision making. – *Cartography and Geographic Information Science* **36** (4): 315–330.
- SCHIEWE, J. & GÄHLER, M., 2006: Modelling uncertainty in high resolution remotely sensed scenes using a fuzzy logic approach. – 1st International Conference on Object-based Image Analysis, Salzburg, Österreich (CD-ROM).
- SCHIEWE, J., 2010: Einsatz von Methoden zur interaktiven Visualisierung und Analyse von Unsicherheiten bei der Auswertung von Geodaten. – *gis.SCIENCE* **23** (1): 26–33.
- SHI, W., 2010: Principles of modeling uncertainties in spatial data and spatial analyses. – CRC Press/ Taylor & Francis, Boca Raton, FL, USA.
- SHI, W. & EHLERS, M., 1993: "S-BAND", a model to describe uncertainty of an object in an integrated GIS/remote sensing environment. – Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '93 (4): 1721–1723.
- SKEELS, M., LEE, B., SMITH, G. & ROBERTSON, G.G., 2009: Revealing uncertainty for information visualization. – *IVS* **0** (1): 70–81, <http://research.microsoft.com/en-us/um/redmond/groups/cue/publications/ivs2009-uncertainty.pdf> (15.3.2013).
- TRIMBLE, 2013: User Guide eCognition Version 8.8. – <http://www.ecognition.com/> (15.6.2013).
- VAN DER WEL, F.J.M., HOOTSMANS, R.M. & ORMELING, F. 1994: Visualization of Data Quality. – MACÉACHREN, A.M. & TAYLOR, D.R.F. (eds.): Visualization in modern cartography. – Pergamon, Oxford, UK & New York, NY, USA.
- ZHANG, J. & GOODCHILD, M.F., 2002: Uncertainty in geographical information. – Taylor & Francis, London, UK.

Adresse der Autoren:

Prof. Dr.-Ing. habil. JOCHEN SCHIEWE & Dipl.-Ing. CHRISTOPH KINKELDEY, HafenCity Universität Hamburg, Lab for Geoinformatics and Geovisualization (g2lab), Hebebrandstr. 1, D-22297 Hamburg, Tel.: +49-40-42827-5442, e-mail: {jochen.schiewe},{christoph.kinkeldey}@hcu-hamburg.de

Manuskript eingereicht: April 2013
Angenommen: Juni 2013



Die Geobasisprodukte Hausumringe und Hauskoordinaten – Charakterisierung und Aufbereitung für Gebäudebestandsanalysen

GOTTHARD MEINEL, Dresden & MANUEL BURCKHARDT, Radebeul

Keywords: Amtliche Geobasisdaten, Hausumringe, Hauskoordinaten, Gebäudegeometrien, Gebäudebestandsanalysen

Zusammenfassung: Obwohl der Gebäudebestand Deutschlands einen sehr hohen wirtschaftlichen Wert darstellt, ist der Informationsbestand zu diesem sehr lückenhaft und ergänzungsbedürftig. So fehlen flächendeckende Informationen zur Gebäudeanzahl und Grundfläche, dem Gebäudetyp, der Geschosshöhe und der Nutzung in hoher thematischer und räumlicher Auflösung. Dieses aber sind Grundinformationen, um beispielsweise Energieeinsparungs- und Klimaschutzziele genügend differenziert und regionalisiert in politischen Programmen und Maßnahmen zu untersetzen. Das statistische Datenangebot zum Gebäudebestand hat sich mit den Ergebnissen des Zensus 2011 verbessert, aber bestehende Datenbedarfe nicht vollständig gedeckt. Die AAA-Geobasisprodukte ATKIS und ALKIS werden zwar gemäß ihrer Modellbeschreibung zukünftig zunehmend detaillierte Gebäudeinformationen enthalten. Diese Informationen stehen aber derzeit noch nicht flächendeckend zur Verfügung. Der Beitrag zeigt darum, wie die bereits bundesweit verfügbaren Geobasisdaten „Amtliche Hausumringe“ in Kombination mit „Amtlichen Hauskoordinaten“ genutzt und verarbeitet werden können, um den Gebäudebestand in hoher räumlicher Auflösung zu beschreiben. Dazu werden die Datenprodukte charakterisiert sowie ihre Vorverarbeitung, Bereinigung, Homogenisierung, Differenzierung in Haupt- und Nebengebäude, eine grobe Nutzungsklassifikation und Kennzeichnung der Gebäudetypen erläutert. Der rein geometrische Datenbestand, der durch die regionalisierte Erhebung seitens der Katasterbehörden sehr heterogen ist, eignet sich prinzipiell für Gebäudebestandsanalysen zur Ergänzung statistischer Datenangebote. Allerdings sind Zeitreihenanalysen auf Basis dieser Datenprodukte durch Veränderungen bedingt durch die ALKIS-Migration derzeit noch problematisch.

Summary: *The Digital Basic Geodata Sets “Hausumringe” and “Hauskoordinaten” – Characterization and Pre-processing for Building Stock Analysis.* Although the building stock of Germany has a very high economic value, the related information is limited and requires completion. For instance, area-wide data are missing for the following properties: number of buildings, footprint, building type, number of floors, and usage with a high thematic and spatial resolution. However, this information is needed to successfully take energy saving and climate protecting targets into account in political programs and actions, all with a sufficient level of detail. The results of the 2011 census will improve the statistics of the building stock, but will not fully meet all data requirements. The German AAA basic geodata products ALKIS and ATKIS contain detailed information about buildings according to the model definition. However, those models are not yet area-wide available. Therefore, the article deals with the question, whether the combination of the new digital geodata sets “Amtliche Hausumringe” (administrative building footprints) and “Amtliche Hauskoordinaten” (administrative georeferenced addresses) are suitable for providing information of the building stock and how they have to be processed in order to describe the building stock with a high spatial resolution. The article describes the two data products and explains their pre-processing, correction, homogenization, distinction in main- and auxiliary buildings, as well as classification of uses and building types. To conclude, the German-wide dataset of the geometry of the buildings is suitable for analyses regarding buildings and add-ons to other statistical data. This is true though the data are captured according to slightly different rules caused by the responsibility of the German states (Bundesländer) and thus are not fully homogenous. Currently, time-series analyses based on these data products are heavier influenced by the migration of the former ALKIS-system to the new ALKIS-system which erroneously sometimes causes changes of the data.

1 Problemstellung und Ziel

Der Gebäudebestand Deutschlands stellt einen sehr hohen wirtschaftlichen Wert dar. Die ohnehin bestehenden Herausforderungen zur Erhaltung und Modernisierung des Gebäudebestandes werden nun ergänzt durch Anforderungen zur Energieeinsparung (Energiewende) und zur CO₂-Reduktion (Klimaschutzziele). Dazu werden auf verschiedenen politischen Ebenen zunehmend Programme wie die European Directive Energy Performance of Buildings (EPBD 2010), das CO₂-Gebäudesanierungsprogramm des Bundes (BMVBS 2010) oder das KfW-Förderprogramm „Energetische Stadtsanierung – Energieeffiziente Quartiersversorgung“ (BMVBS 2012) formuliert, welche über die Gebäudesanierung hinaus teilweise auch städtebauliche Komponenten enthalten. Gemessen an seiner Bedeutung ist das Wissen über den Gebäudebestand, dessen Struktur, z. B. Funktion, Alter, Größe, Form, Anordnung, stoffliche Zusammensetzung, Nutzungsparameter, also Wohnungs- und Bewohnerzahl, Energieverbrauch und Dynamik (Abriss, Neubau, Umnutzung, Sanierung) außerordentlich gering. So verwundert es nicht, dass sich in den letzten Jahren Forschungsaufträge zur Erhebung des Gebäudebestands in Deutschland häufen, u. a. BMVBS (2011), BBSR (2011) und BBSR (2012). Durch die Verknüpfung von Gebäudebestandsdaten mit gebäudetypischen Energiekennzahlen von Wohn- und Nichtwohngebäuden (BBSR 2011) können Energieverbrauchszahlen sowie Energie- und CO₂-Einsparpotenziale abgeschätzt und Förderprogramme zielgenau aufgelegt werden.

Die bis Mai 2013 einzigen amtlichen Statistikdaten zum Gebäudebestand beruhen auf Fortschreibungen der letzten Gebäude- und Wohnungszählung (GWZ) vom Jahr 1987 (alte Bundesländer) bzw. 1995 (neue Bundesländer). Sie sind daher ungenau und mit der Gemeinde als kleinste räumliche Berichtseinheit für die Beantwortung beispielweise raumwissenschaftlicher oder -planerischer Fragen auch zu grob aufgelöst. Aber planerische Fragestellungen wie zur intrakommunalen Gebäudestrukturverteilung oder zur Bestandsentwicklung in Überschwemmungsgebieten erfordern weitergehende räumliche Differenzierungen

bzw. einen direkten Raumbezug aller Gebäude. Hier bieten sich die in den letzten Jahren vollständig digitalisierten Katasterdaten als Informationsquelle an, die auch den Gebäudebestand in Lage und Grundriss darstellen. So besitzen die Produkte Automatisierte Liegenschaftskarte (ALK) sowie deren Nachfolger, das Amtliche Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS) und das Amtliche Kartographisch-Topographische Informationssystem (ATKIS), in der Modellbeschreibung der Objektart Gebäude (31001) auch Attribute zur Bauweise, Gebäudenutzung, Geschosszahl, Baujahr, Grundfläche, Gebäudevolumen und Dachform. Allerdings gehören diese Attribute nicht zum Grunddatenbestand und sind darum sehr lückenhaft. Daher sind diese Datenprodukte für die Erstellung belastbarer, flächendeckender Gebäudebestandsanalysen noch nicht geeignet. Vorerst ist darum die Nutzung bestehender Gebäudegeometrien angezeigt. Als sehr hilfreich erweist sich dabei die Auskopplung der Gebäudegrundrisse und der Adresskoordinaten der Liegenschaftskarte in den Produkten amtliche Hausumringe (HU) bzw. amtliche Hauskoordinaten (HK). Der Beitrag verfolgt das Ziel, den Informationsgehalt dieser beiden Datenprodukte zu prüfen, die Daten operationell für die gesamte Bundesrepublik aufzubereiten, soweit wie möglich zu homogenisieren, die Geometriedaten mit semantischen Informationen wie Haupt-/Nebengebäude, Gebäudenutzung und -typ anzureichern sowie die Belastbarkeit der Daten für Gebäudebestandsanalysen zu beurteilen.

Sollen diese auf Grundlage von Vermessungsdaten die amtliche Statistik ergänzen, muss der Gebäudebegriff der amtlichen Statistik berücksichtigt werden: *„Als einzelnes Gebäude gilt bei zusammenhängender Bebauung jedes Gebäude, das durch eine vom Dach bis zum Keller reichende Brandmauer von anderen Gebäuden getrennt ist. Ist keine Brandmauer vorhanden, so gelten die zusammenhängenden Gebäudeeinheiten als einzelne Gebäude, wenn sie ein eigenes Erschließungssystem (eigener Zugang und eigenes Treppenhäus) besitzen und für sich benutzbar sind.“* (DESTATIS 2012). Dieses ist bei der späteren Aufbereitung der Gebäudegeometriedaten von besonderer Bedeutung, da häufig gereichte Gebäude (Doppelhäuser, Reihenhäuser,

Zeilenbauten) als Gebäudeverband und nicht als Einzelgebäude modelliert wurden, was zu einer erheblichen Verfälschung von Gebäudebilanzen führen würde (falsche Gebäudezahl und -typisierung).

2 Datenbeschreibung

Seit 2010 werden die Geobasisprodukte amtliche Hausumringe und amtliche Hauskoordinaten, auch georeferenzierte Adressdaten genannt, von der Zentralen Stelle für Hauskoordinaten, Hausumringe und 3D-Gebäudemodelle (ZSHH) der Bezirksregierung Köln für länderübergreifende oder bundesweite Untersuchungen angeboten. Die Nutzung dieser Datensätze für deutschlandweite Analysen hat gegenüber der Verwendung der ALK bzw. ALKIS viele Vorteile: Sie sind flächendeckend vorhanden, wesentlich preiswerter und in einem einheitlichen Raumbezug verfügbar. Das Manko fehlender Attributwerte wiegt an-

gesichts der großen Unterschiede im Erfassungsstand und wegen bestehender Länderspezifika bei ALK und ALKIS nicht schwer.

Die ZSHH übernimmt jeweils zum 1.4. eines Jahres die Daten der Länder, homogenisiert sie (Georeferenzierung, Datenformat) und gleicht die georeferenzierten Adressdaten mit Postdatenbeständen ab. Datenfehler werden den Datenlieferanten mitgeteilt, nicht aber behoben. Diese Produkte werden mit einem einheitlichen Gebühren- und Lizenzmodell sowie Datenformat vertrieben, was erstmals bundesweite Untersuchungen ermöglicht. Die Produktabgabe erfolgt in einer einheitlichen Georeferenzierung (UTM/ETRS89, DHDN/GK oder geografischen Koordinaten). Eine detaillierte Beschreibung der Datensätze findet man in ZSHH (2012).

Die beiden Datenprodukte sind aus der Automatisierten Liegenschaftskarte ALK (in Bayern der Digitalen Flurkarte) bzw. dem Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS) abgeleitet. Die Quelle ist

Tab. 1: Dezentrale Führung des Liegenschaftskatasters – Quelle der Geobasisprodukte Hausumringe und Hauskoordinaten (Quelle: Internetseiten der Landesbehörden, Stand: 10/2012).

Bundesland	Organisation des Liegenschaftskatasters	Zahl datenführender Katasterämter
Brandenburg	kommunal (Katasterämter)	18
Berlin	Bezirksämter	12
Baden-Württemberg	Landkreise	60
Bayern	Vermessungsämter	51
Bremen	zentral	1
Hessen	untere Behörden	7
Hamburg	zentral	1
Mecklenburg-Vorpommern	Landkreise	8
Niedersachsen	Örtliche Dezernate	50
Nordrhein-Westfalen	Landkreise	31
Rheinland-Pfalz	kommunal (Katasterämter)	19
Schleswig-Holstein	untere Behörden	5
Saarland	zentral	1
Sachsen	Landkreise	13
Sachsen-Anhalt	untere Behörden	4
Thüringen	untere Behörden	8
Deutschland gesamt		289

damit das amtliche Verzeichnis aller Flurstücke und Gebäude in Deutschland. Diese sind in der ALK in der Regel durch individuelle Vermessung vor Ort erfasst und verfügen meist über eine hohe geometrische Genauigkeit (mittlere Lagetreue: $\pm 0,5$ m). Hausumringe beschreiben georeferenzierte Umringpolygone von Gebäudegrundrissen ohne Dachüberstand und ohne unterirdische Gebäude und sind der ALK-Folie 011 entnommen, in einigen Bundesländern auch ergänzt durch photogrammetrisch erfasste Gebäude. Die Hausumringe stellen reine Geometriedaten ohne jegliches Sachattribut dar.

Die Hauskoordinaten beschreiben die räumliche Position der ca. 21 Millionen Gebäude mit postalischer Adresse in Deutschland. Jedes Gebäude besitzt eine eindeutige ID, ein lagebezogenes Qualitätsattribut (Kapitel 3.1), die Verwaltungszugehörigkeit, Schlüssel für Land, Regierungsbezirk, Kreis, Gemeinde, Orts- bzw. Gemeindeteil sowie die amtliche Adresse mit Straßennamen, Hausnummer, Postleitzahl und postalischem Orts- und Ortsteilnamen.

Auch wenn die ALK und das ALKIS durch die AdV modellseitig bundesweit definiert und landesweit einheitlich, wenn auch spezifisch, geregelt ist, führt die dezentrale Datenerhebung in derzeit 289 (Oktober 2012) regionalen Katasterbehörden (Tab. 1), die immer wieder auch Umstrukturierungen und Zugehörigkeitsveränderungen erfahren, zu einer erheblichen Heterogenität der Daten. Unterschiede in der Vollständigkeit, Aktualität und Modelltreue der Daten sind wohl neben der sehr unterschiedlichen Ressourcenausstattung der Behörden (Personal, Technik, Vernetzung) auch auf die Historie der Liegenschaftskarte zurückzuführen. Nicht nur die Bezugssysteme waren uneinheitlich, auch die Erfassungskriterien von Gebäuden, insbesondere deren Mindestgröße. In den ostdeutschen Ländern wurde zudem die Führung des Gebäudebestandes im Kataster nach 1945 nicht so konsequent verfolgt wie in den alten, da es keine Gebäudeeinemesspflicht gab. So ist noch heute der Gebäudebestand der ALK und damit auch der Hausumringe in einigen neuen Bundesländern lückenhaft (Kapitel 3). Zur Komplettierung des Gebäudebestandes wurden seitens der Vermessungsbehörden unter-

schiedliche Ansätze verfolgt: Vermessung der fehlenden in diesem Zeitraum errichteten Gebäude durch die Katasterämter, Gebäudeergänzungen durch Ortholuftbildkartierung oder generelle photogrammetrische Gebäudeerfassung unter Aufgabe der Einmesspflicht. Letztlich hängt die Vollständigkeit und Aktualität der Gebäudeerfassung und damit die Qualität des Datensatzes von der konsequenten Durchsetzung der Einmessungspflicht der Gebäudeeigentümer ab.

Die Grundlage der im Folgenden beschriebenen Datenanalyse bildet ein bundesweiter Datensatz der Hausumringe und der Georeferenzierten Adressdaten Bund (GAB), der vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie im Oktober 2011 bezogen wurde und je nach Bundesland eine Datenaktualität zwischen 01/2011 – 06/2011 aufweist. Der nach Bundesländern gegliederte ArcGIS-Shape-Datensatz (GK3, Ellipsoid Bessel, Datum Potsdam) umfasst ca. 49 Millionen Geoobjekte mit einem Speichervolumen von 10 GB. Die Daten wurden in eine FileGeodatabase (FGDB) getrennt nach Bundesländern konvertiert.

3 Prüfmethodik und Ergebnisse

Die Prüfmethodik orientiert sich an dem Ziel, erstmals Vermessungsdaten zur Erstellung von Gebäudebestandsanalysen zu nutzen. Die Daten müssen darum hinsichtlich der Gebäudeanzahl und -grundfläche bis zur Gemeindeebene verlässliche Angaben ermöglichen. Dieses betrifft insbesondere die Vollständigkeit der Gebäudeerfassung und die Aufteilung von Gebäudeverbänden in Einzelgebäude. Auch sollte eine Unterscheidung in Haupt- und Nebengebäude und Angaben zur Hauptnutzung ermöglicht werden. Kleinere Lageverschiebungen (< 1 m) sind unkritisch, größere Lageverschiebungen sind dagegen bei zeitlichen Vergleichen des Gebäudebestandes problematisch.

Zuerst erfolgte eine visuelle Kontrolle der Gebäudemodellierung durch Überlagerung der Hausumringe und Hauskoordinaten mit Referenzdaten. Die Gebäudemodellierung wurde dabei hinsichtlich Generalisierungsgrad, Auftrennung in Einzelgebäude, Lagetreue und Lagevergleich zum Adresspunkt

überprüft. Diese stichpunktartig durchgeführten Untersuchungen wurden unter Nutzung der Geodienste des Bundes *Digitale Orthophotos* (wms-dop) und *ATKIS Basis-DLM* (wms-bdlm) für jedes Bundesland separat und jeweils ausgewählte städtische sowie ländliche Gebiete durchgeführt (Tab. 2). Durch gemeinsame Visualisierung und Verschneidung der Hausumringe und -koordinaten konnten Rückschlüsse auf die Vollständigkeit der Hausumringe gezogen werden. Dabei offenbarte sich ein Lageversatz der Hausumringe in einigen Bundesländern, der letztlich auf Datentransformationen zwischen den datenliefernden Einrichtungen und dem ZSHH bzw. dortigen internen Transformationen zurückzuführen war. Offene Fragen wurden, wenn möglich, mit den jeweiligen datenführenden Stellen diskutiert, um ggf. systematische Probleme aufzudecken.

3.1 Prüfergebnis Georeferenzierte Adressdaten Bund (Hauskoordinaten)

Hauskoordinaten sind für die Prüfung der Hausumringdaten aber auch die spätere Analyse des Gebäudebestandes äußerst hilfreich.

Sie ermöglichen beispielweise die Auftrennung von Gebäudeumringen gereihter Häuser, wenn diese entgegen der Modellvorschrift nur als Gebäudeverband modelliert wurden. Auch ermöglichen sie die Differenzierung des Gebäudebestandes in Haupt- und Nebengebäude, da nur erstere über eine postalische Adresse (= Hauskoordinate) verfügen. Hauskoordinaten sind meist aktueller als Hausumringe, da sie bereits vor der Errichtung bzw. Einmessung des Gebäudes vergeben werden. Allerdings obliegt die Vergabe der Hausadressen den Kommunen, so dass Unterschiede in der Vergabepraxis der Hauskoordinaten bekannt sind. Der Adressdatenbestand wird in dem Datenangebot des ZSHH seit 2012 durch die Deutsche Post Direkt GmbH mit postalischen Informationen sowie aktuellen Adressveränderungen ergänzt, die durch die Länder kontrolliert und im ZSHH zusammengeführt werden.

Die Lagetreue jeder Hauskoordinate kann dem Datenattribut Qualität („Quali“) entnommen werden. Der Attributwert A verweist auf eine sichere Adresse innerhalb des Hausumrings, Attributwert B auf ein vorhandenes aber noch nicht eingemessenes Gebäude innerhalb des Flurstückes und Attributwert R auf ein noch nicht sicher vorhandenes Ge-

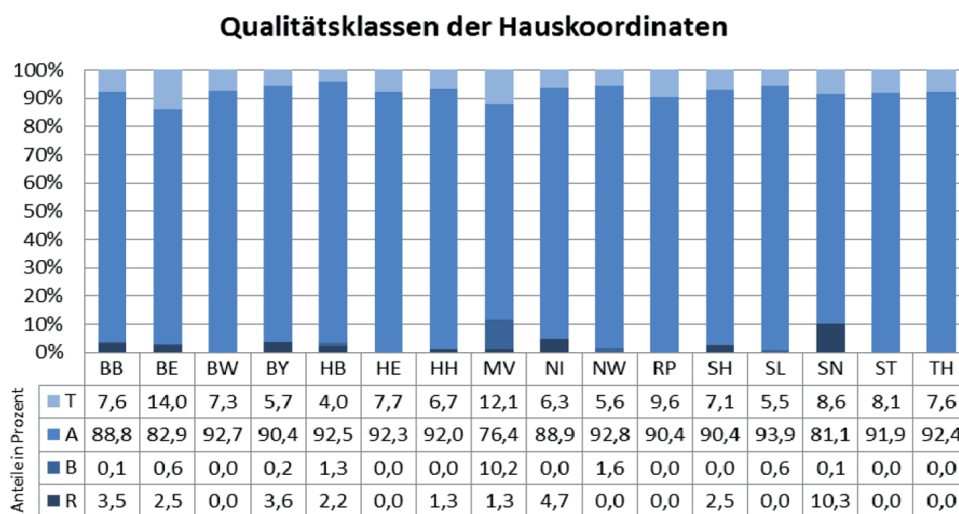


Abb. 1: Qualitätsklassen der Hauskoordinaten der Bundesländer (Quelle: eigene Bestimmung) (Herkunft bzw. Lagetreue der Hauskoordinate: T = Institut für angewandte Sozialwissenschaft (infas), A = sichere Adresse, B = vorhandenes, aber noch nicht eingemessenes Gebäude, R = noch nicht sicher vorhandenes Gebäude).

Tab. 2: Vollständigkeit der Hausumringe, visuelle Abschätzung durch Karten- und Luftbildvergleich (BURCKHARDT 2012).

Bundesland	Koordinaten von nicht eingemessenen Gebäuden ¹		Anteil fehlender HU in % ²	Problembeschreibung	Hausumringe vollständig
	Anteil in %	Bedeutung			
BB	4	Reservierungskordinaten, nicht eingemessene Gebäude	< 1	einzelne Gebäude fehlen	ja
BE	4	Reservierungskordinaten, nicht eingemessene Gebäude	< 1	einzelne Gebäude fehlen	ja
BW	0	--	< 1	wenige nicht eingemessene Gebäude ohne Adresskoordinate	ja
BY	4	Reservierungskordinaten	< 1	wenige nicht eingemessene Gebäude ohne Adresskoordinate	ja
HB	4	wenige Reservierungskordinaten, viele im Umring ³	< 1	einzelne Gebäude fehlen	ja
HE	0	--	0	kein fehlender Umring gefunden	ja
HH	1	Reservierungskordinaten	0	kein fehlender Umring gefunden	ja
MV	13	Reservierungskordinaten, > 90% nicht eingemessene Gebäude	10–15	Hausumringe nicht vollständig , nicht eingemessene Gebäude meist mit Koordinate (R) versehen, wenige Fehlende Gebäude ohne Koordinate	nein
NI	5	Reservierungskordinaten, einige im Umring ³	< 1	einzelne Gebäude fehlen	ja
NW	2	Reservierungskordinaten, wenige nicht eingemessene Gebäude	< 1	einzelne Gebäude fehlen	ja
RP	0	--	< 1	einzelne Gebäude fehlen, nicht eingemessene Gebäude ohne Adresskoordinate	ja
SH	3	Reservierungskordinaten	< 1	einzelne Gebäude fehlen	ja
SL	1	Reservierungskordinaten, z.T. doppelt vorhanden (Qualität A+B)	< 1	einzelne Gebäude fehlen	ja
SN	11	Reservierungskordinaten, > 90% nicht eingemessene Gebäude	10–15	Hausumringe nicht vollständig , nicht eingemessene Gebäude besitzen meist eine Koordinate (R), zusätzlich einige fehlende Gebäude ohne Hauskoordinate,	nein
ST	0	--	< 1	einzelne Gebäude fehlen, nicht eingemessene Gebäude ohne Adresskoordinate	ja
TH	0	--	< 1	Reservierte Koordinaten vorhanden, aber als „A“ gekennzeichnet	ja

¹ Koordinaten der Qualität R und B
² nach visueller Abschätzung
³ Begründung: Aktualitätsdifferenz der Datensätze (HK 2010, HU 2011), in der Zwischenzeit ist Erfassung der Gebäude erfolgt

bäude innerhalb des Flurstücks. Während die Vergabe des Attributs A in den meisten Fällen korrekt erfolgt, wird die Zuweisung der Attribute B bzw. R sehr unterschiedlich gehandhabt. Sie kennzeichnen Koordinaten von Gebäuden, die nicht sicher in der Örtlichkeit vorhanden sind, und für künftige Bauvorhaben reservierte Koordinaten. Das Attribut T (nur bei dem BKG-Datenprodukt GAB) zeigt Hauskoordinaten vom Institut für angewandte Sozialwissenschaft (infas) an, die den amtlichen Datensatz ergänzen. Die Untersuchungen ergaben, dass die ergänzten Adressdaten (ca. 7 %) redundant und in der Lagetreue problematisch sind, so dass diese in die weiteren Untersuchungen nicht einbezogen wurden. Wie die Analysen zeigten, liegt der Anteil lagetreuer Adresskoordinaten bzgl. der Hausumringe (Quali = A) bei etwa 90 %, nur die Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern (76,4 %) und Sachsen (81,1 %) weisen deutlich geringere Werte auf (Abb. 1).

3.2 Prüfergebnis Hausumringe

Auch wenn durch laufende Fortführung des Katasters von einer tagaktuellen Führung gesprochen wird, dauert die Erfassung eines Gebäude Neubaus in der ALK bzw. dem ALKIS und somit auch in dem Produkt Hausumringe selbst bei fristgerechter Einmessung oft ein Jahr und mehr. Dieses bedingt in Gebäudebestandsanalysen immer einen verfahrensbedingten Aktualitätsverlust in dieser Größenordnung. Tatsächlich sind die Inaktualitäten wesentlich größer, wenn das Kataster historisch bedingt Lücken im Gebäudebestand aufweist, wie dieses in Ostdeutschland noch teilweise der Fall ist.

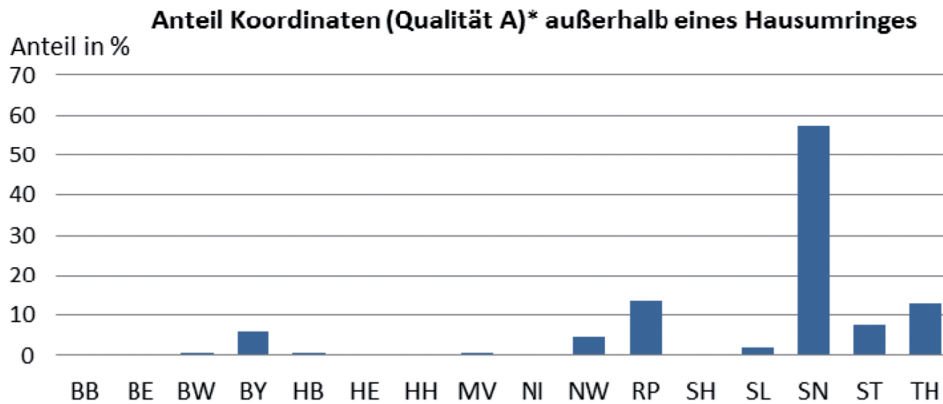
Die Überprüfung der Vollständigkeit der Hausumringe gestaltet sich angesichts fehlender Referenzgeometrien als schwierig. In den Bundesländern Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen wurde wegen der größeren Lücken im ALK/ALKIS-Gebäudebestand der photogrammetrisch erhobene Gebäudebestand aus dem ATKIS Basis-DLM für den Vergleich herangezogen, weil dieses den Gebäudebestand wesentlich aktueller und vollständiger abbildet. Die Ergebnisse der stich-

probenartigen Vollständigkeitskontrolle der Hausumringe, die insbesondere im Umfeld von Hauskoordinaten der Qualitätsattribute B (Gebäude innerhalb Flurstück) und R (nicht sicher vorhanden) erfolgte, zeigt Tab. 3.

Verfahrensbedingt erfolgt die Gebäudegrundrisserfassung im Kataster immer mit zeitlichem Verzug und erst nach der Hauskoordinatenerfassung. Darum sind fehlende Hausumringe in der Größenordnung bis 1 % normal. Als unvollständig erwies sich der Gebäudebestand der Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen, wo mindestens 13 % bzw. 11 % der Gebäude in den Hausumringdaten fehlten. Allerdings sind auch innerhalb der Bundesländer Unterschiede feststellbar. Durch die bessere Ressourcenausstattung mit Personal und Technik sind die Gebäudedaten größerer Städte in der Regel vollständiger als die ländlicher Gebiete. Während beispielsweise der Gebäudebestand in Dresden vollständig abgebildet wird, gibt es in ländlichen Regionen Sachsens noch teilweise große Lücken. In Mecklenburg-Vorpommern fehlen in einigen Gemeinden bis zu 65 % des Gebäudebestandes!

Auch die Modelltreue wurde geprüft, da diese die spätere Gebäudebestandsanalyse signifikant beeinflusst. Die Gebäudemodellierung wurde in der GeoInfoDok durch die AdV wie folgt festgelegt: *„Um Teile eines Gebäudes unterschiedlich attributieren zu können, sind mehrere ‘Gebäude’ zu bilden, sofern kein Bauteil angelegt werden kann. Wenn Differenzierungen innerhalb eines Gebäudes vorzunehmen sind (z.B. bei Gebäuden mit vertikaler Gliederung), sind diese als ‘Bauteile’ modelliert.[...]“* (AdV 2008).

Die Datenprüfung ergab, dass der deutschlandweite Datenbestand erhebliche Modellierungsdifferenzen, insbesondere bei komplexen Gebäuden mit angrenzenden Nebengebäuden und Bauteilen, aufweist. So werden die Gebäude Hessens beispielsweise besonders kleinteilig modelliert, in Sachsen dagegen stark generalisiert. In Hessen muss für Gebäudebestandsanalysen durch die Zusammenfassung von Gebäudeteilen eine Homogenisierung erfolgen. Ein weiteres Problem stellt die Modellierung von Gebäudeverbänden dar, die oftmals nicht als Einzelgebäude sondern als Gesamtumring modelliert wurden



*Definition: Koordinate sicher in Gebäudefläche

Abb. 3: Anteil Kleinstgebäude am Gesamtbestand.

(Abb. 2). Das Verfahren zur Gebäudeaufteilung wird in Kapitel 4 beschrieben.

Die visuelle Bewertung der Modelltreue für ausgewählte Städte (Tab. 3) zeigt die großen Unterschiede zwischen den Bundesländern, z. B. zwischen Baden-Württemberg und Brandenburg, aber auch innerhalb der Bundesländer (Hessen, Niedersachsen, Bayern).

Hierbei ist allerdings nicht auszuschließen, dass teilweise ursprünglich vorhandene Gebäudetrennlinien der ALK-Gebäude bei der Transformation in die Hausumringe verloren gingen, wie einige Datenanbieter mitteilten. Letztlich wird auch die Erfassung von Kleinstgebäuden (< 10 m² wie Kleingartenhäuschen) sehr unterschiedlich gehandhabt, was deren stark unterschiedlichen Anteil am Gesamtgebäudebestand der Bundesländer (Abb. 3), aber auch regionale und lokale Differenzen zeigen.

Bezüglich der Lagegenauigkeit, die nach Metadatenbeschreibung bei den Hausumringen bei $\pm 0,5$ m liegen soll, mussten durch den Vergleich mit Hauskoordinaten systematische Lageversätze um ca. 2,5 m in Bayern, NRW, Rheinland-Pfalz und Sachsen festgestellt werden. Diese sind überwiegend auf Fehler bei der Transformation aus dem jeweiligen Landesbezugssystem in das GK3, in dem die Daten bezogen wurden, zurückzuführen.

4 Korrekturmethodik

Die Prüfung der Datenbestände erbrachte, dass Fehlerberichtigungen, Homogenisierungen, Modellkorrekturen, Klassifikationen und Attributergänzungen erforderlich sind, bevor die Hausumringe und -koordinaten Grundlage einer Gebäudebestandsanalyse werden können. Den groben Ablauf der automatisierten Aufbereitung der Gebäudegeometriedaten HU und HK für nachfolgende Gebäudebestandsanalysen zeigt Abb. 4.

Die Gebäudeauftrennung von ungeteilten gereihten Gebäuden, die durch Auswahl aller Gebäude mit mehr als einer Adresse erfolgt, wird durch die Aufspannung von Thiessen-Polygonen (Funktion *CreateThiessenPolygons*) zwischen den Hauskoordinaten und anschließender Verschneidung mit den Hausumringen (*intersect*) realisiert (Abb. 5). Damit wurden bei linear gereihten Gebäudeverbänden sehr gute Ergebnisse erzielt. In den Ecken abgewinkelter Gebäudereihungen führt diese Methode allerdings zu künstlichen (schrägen) Teilungen. Diese aber stellen hinsichtlich des verfolgten Zieles der Datennutzung für Gebäudebestandsanalysen keine Beeinträchtigung dar, da sie keinen Einfluss auf die spätere Bilanzierung der Gebäudeanzahl und nur einen sehr geringen bezüglich der Analyse von Gebäudegrößenklassen erwarten lassen. Teilweise entstehende Splitterpolygone wurden eliminiert oder mit dem be-

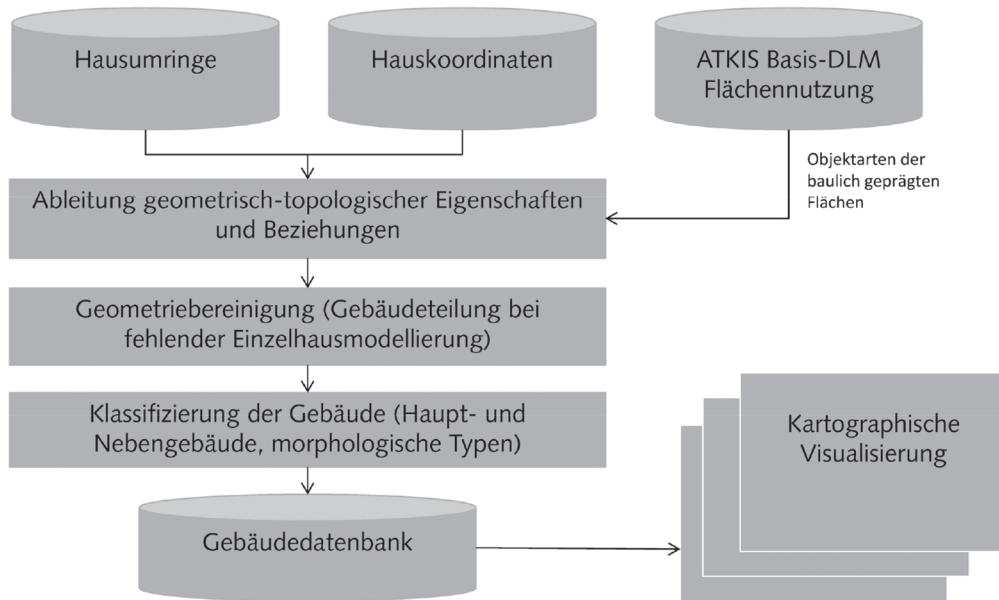


Abb. 4: Ablauf der automatisierten Aufbereitung der Hausumringe und -koordinaten (Quelle: eigene Darstellung).

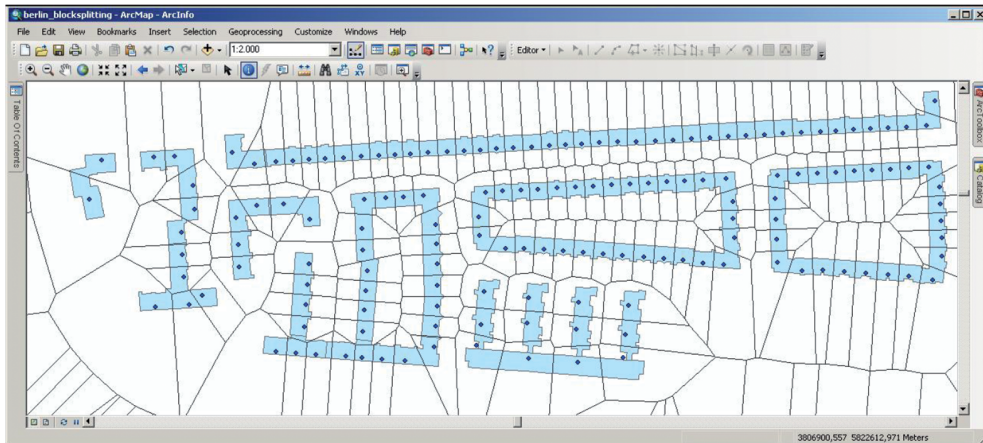


Abb. 5: Auftrennung von Gebäudeverbänden in Einzelgebäude durch Thiessen-Polygone.

nachbarten Einzelgebäude wieder vereinigt. Um Fehler oder Abstürze bei der Thiessen-polygonberechnung zu vermeiden, insbesondere bei extremen Dreiecksbildungen, musste die Gebietsfläche in Teilflächen mit jeweils ca. 5.000 räumlich benachbarten Hausumringen aufgeteilt werden. Dafür wurden die betroffenen Hauskoordinaten nach Postleitzahlgebieten selektiert und anschließend die erzeugten

Thiessen-Polygone und zugehörigen Hausumringe sequentiell prozessiert.

Gebäudebestandsanalysen erfordern eine Nutzungsdifferenzierung des Gebäudebestandes, die bei Hausumringen und -koordinaten nicht zur Verfügung steht. Hier bietet sich, solange die vollständige Attributierung von ALKIS aussteht, das ATKIS Basis-DLM an, das die Nutzung der Fläche, auf denen die Gebäu-

de stehen, nach Wohnbau, Industrie/Gewerbe, gemischte Nutzung, besondere funktionale Prägung, Verkehrsfläche oder Erholungs-, Freizeit- und Sportflächen differenziert. Durch Verschneidung der Gebäudeschwerpunkte mit dieser Nutzungsinformation wurde jedem Gebäude ein Nutzungsattribut zugeordnet. Natürlich ist damit nur eine Nutzungsabschätzung möglich, denn die Nutzung einzelner Gebäude innerhalb eines ATKIS-Blocks kann sich durchaus unterscheiden.

Die Klassifizierung der Hausumringe in Haupt- bzw. Nebengebäude erfolgt über die Hauskoordinate (postalische Adresse), da nur Hauptgebäude über eine postalische Adresse verfügen. Nebengebäude wurden dabei für spätere Bestandsanalysen sinnvollerweise hinsichtlich freistehenden und angeschlossenen Nebengebäuden unterschieden. Für die Kennzeichnung der Nebengebäude muss festgestellt werden, ob ein Gebäude einen direkt angeschlossenen Nachbarn besitzt. Dazu wurden benachbarte Hausumringe zuerst zusammengefasst (Dissolve), dann durch eine Verschneidung bestimmt, wie viele Hausumringe in diesem Gebäudeverband liegen und schließlich durch eine weitere Verschneidung diese Zahl in jeden Hausumring eingetragen.

Die Hausumringdaten enthalten eine große Zahl von Kleinstgebäuden wie Garagen, Schuppen, Lauben, Trafohäuschen usw. Da deren Erfassung in den Katasterämtern äußerst uneinheitlich erfolgt und Kleinstgebäude für Bestandsanalysen nur eine untergeordnete Rolle spielen, wurden diese aus den Hausumringdaten eliminiert, wenn die Gebäudegrundfläche $< 10 \text{ m}^2$ ist (Grenzwert nach SächsVermKatGDVO, SMI 2011).

Zur Klassifizierung des Gebäudetyps, freistehende Einzelgebäude, Doppelhäuser, Reihenhäuser usw., der durch die Anzahl direkt benachbarter aneinandergereihter Einzelgebäude bestimmt wird, wurde die Einzelgebäudeanzahl durch Summation der Hauskoordinatenanzahl innerhalb eines Gebäudeverbands übernommen. Da die Hauskoordinaten nicht immer in den Hausumringen liegen, müssen auch außerhalb liegende berücksichtigt und dem nächstliegenden Hausumring zugeordnet werden.

Abschließend werden die Hausumringe um den amtlichen Gemeindeschlüssel (AGS) ergänzt.

5 Operationelle Prozessierung

Die Datenprodukte HU und HK sollen Grundlage eines Monitorings der Gebäudebestandsentwicklung innerhalb des Monitors der Siedlungs- und Freiraumentwicklung (IÖR-MONITOR 2012) werden. Dazu ist eine automatisierte Datenaufbereitung und -analyse der ca. 49 Millionen Gebäudegeometrien erforderlich. Diese wurde in einer Abfolge von 14 Python-Skripten in ArcGIS-Tools umgesetzt (Tab. 4). Zwischenergebnisse ermöglichen Kontrollen und Fehlerberichtigungen. Die Berechnung umfasst die folgenden Arbeitsschritte:

- Datenvorverarbeitung mit Geometriebereinigung (Konvertierung in Geodatabase, RepairGeometry, Indizes erstellen), Eliminierung von Infas-Koordinaten, Kennzeichnung ob Hauskoordinate in Hausumring liegt;
- Ersatz der Hausumringe Sachsens durch die Gebäude des ATKIS Basis-DLM;
- Übernahme der Objektart der Fläche, in der das Gebäude steht, aus dem ATKIS Basis-DLM (Wohnbau, Industrie, Gemischte Nutzung, Besondere funktionale Prägung, Siedlungsfreifläche, Vegetation, Verkehr);
- Eintrag der Anzahl der Adresskoordinaten für jedes Gebäude unter Berücksichtigung von Koordinaten auch außerhalb von Hausumringen (Nachbarschaft);
- Gebäudeverbände selektieren, Teilung von Gebäudeverbänden mit mehreren Adressen, Bereinigung von Splitterpolygonen;
- Auflösung der Trennung von Haupt- und Nebengebäuden, wenn diese eine gemeinsame Grenzlinie haben;
- Klassifizierung der Gebäude als Haupt- (mit Hauskoordinate) oder freistehendes Nebengebäude (ohne Hauskoordinate wie Garagen, Schuppen, Anbauten, Kleingarten- und Trafohäuschen, teilweise aber auch größere Industriegebäude);
- Bestimmung des Wohngebäudetyps (Einzel-, Doppel-, Reihenhäuser) über die Anzahl benachbarter Polygone mit Hauskoordinaten;
- Kennzeichnung von Kleinstgeometrien $< 10 \text{ m}^2$ als Nichtgebäude;
- Übernahme des amtlichen Gemeindeschlüssels (AGS) aus einer aus dem Basis-DLM abgeleiteten Verwaltungsgeometrie VG25;

Tab. 4: Prozessierungszeiten (Intel Core i5 mit 3,2 GHz und 2,92 GB RAM).

Verarbeitungsschritt	Skript	Rechenzeit
Datenvorverarbeitung	01 Vorbereiten Hausumringe	41h 34 min
	02 Vorbereiten Hauskoordinaten	4h 08 min
Gebäudeersatz	03 Ergänzung ATKIS-Gebäude (Sachsen)	1h 50 min
Gebäudenutzung	04 Ergänzung ATKIS-Objektart	21h 12 min
Gebäudeadressen	05 Berechnung der Adressanzahl	50h 22 min
Disaggregation von Gebäudeverbänden	06 Selektion zu teilender Gebäudeverbände	3h 24 min
	07 Teilung Gebäudeverbände	2h 42 min
	08 Problembehebung Gebäudeteilung	10 min
	09 Polygonbereinigung	2h 15 min
Nebengebäude	10 Filterung und Kennzeichnung	26h 45 min
Gebäudeverbandsgröße	11 Bestimmung Gebäudetypologie	61h 46 min
Gemeindeschlüssel	12 Ergänzung AGS	18 h 26 min
Datenstruktur wieder herstellen	13 Prozessbedingte Aufteilung aufheben	7h 10 min
Klassifikation	14 Gebäudeklassifikation	6h 01 min
Gesamtzeit		~ 248h

- Aufkachelung aufheben und damit Datenstruktur wieder herstellen.

Die Verfahrensschritte wurden in einer ArcGIS Toolbox implementiert. Die Prozessierung der sehr großen Datenmengen führt in einzelnen Skripten zu Programmabbrüchen, die erst durch eine automatische Gebietsaufteilung behoben werden konnten. Tab. 4 zeigt die derzeitigen Berechnungszeiten für den gesamten deutschen Datensatz.

Zum Abschluss der automatisierten Prozesskette liegen bereinigte Gebäudegeometriedaten vor, die Gebäudebestandsanalysen ermöglichen.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Geobasisprodukte HU und HK sind derzeit die einzigen GIS-technisch auswertbaren flächendeckenden und zentral verfügbaren Informationsquellen zum Gebäudebestand in Deutschland. Ihre Bereitstellung ermöglicht erstmals Gebäudebestandsanalysen auf dieser Datengrundlage in Ergänzung statistischer Erhebungen. Die noch jungen Produkte weisen noch in einigen Bundesländern oder in

dem Zuständigkeitsbereich einzelner katasterführender Stellen Mängel auf, die teilweise inzwischen behoben wurden, z. B. photogrammetrische Gebäudeergänzung in Mecklenburg-Vorpommern. Durch die dezentrale Erfassung in den Katasterämtern sind erhebliche Unterschiede in der Digitalisierung, insbesondere auch innerhalb einzelner Bundesländer, festzustellen. Für belastbare länderübergreifende Gebäudebestandsanalysen müssen Korrekturen und eine Homogenisierung der Eingangsdaten erfolgen, soweit diese möglich sind. Teilweise festgestellte systematische Lageversätze sind in der Regel auf Fehler bei der Transformation von ALK-Gebäuden zu Hausumringen zurückzuführen und sollten künftig vermeidbar sein. Für Bestandsanalysen sind die unterschiedlichen Modellierungsqualitäten zu berücksichtigen. Problematisch war die Unvollständigkeit der Hausumringe der Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen, die für Sachsen durch Rückgriff auf die vollständigeren Gebäudedaten des ATKIS Basis-DLM behoben werden konnte.

Die Geometrie der Hausumringe konnte weitestgehend bereinigt und fehlerhafte Polygone (Splitterpolygone etc.) gekennzeichnet werden. Mithilfe der aus Hauskoordinaten

abgeleiteten Thiessen-Polygone konnten bei fehlender Einzelgebäudemodellierung zusammenhängend modellierte Gebäudegruppen in Einzelgebäude zerlegt werden, eine unabdingbare Voraussetzung für Gebäudebestandsanalysen. Durch Verschneidung mit Flächennutzungsdaten des ATKIS® Basis-DLM konnten die rein geometrischen Eingangsdaten mit semantischen Informationen angereichert werden. Die Identifizierung von freistehenden und angeschlossenen Nebengebäuden erfolgte unter Beachtung eigener empirischer Analysen zur Größe der Gebäudegrundfläche. Ein Gebäude wird als Hauptgebäude klassifiziert, wenn dieses über eine postalische Adresse (= Hauskoordinate) verfügt. Polygone, die kleiner als 10 m² sind, werden als „Nichtgebäude“ gekennzeichnet. Über die Anzahl benachbarter Gebäudepolygone konnten Wohngebäudetypen wie Einzel-, Doppel- und Reihenhäuser abgeleitet werden. Am Ende des aufwendigen Geoprocessings steht ein berichtigter und ergänzter geometrischer Gebäudedatensatz, der Gebäudebestandsanalysen ermöglicht. Mit dem beschriebenen Vorgehen soll kein neuer oder gar amtlicher Datenbestand aufgebaut werden. Vielmehr sollen pragmatische Antworten auf drängende Fragen zum Gebäudebestand auf Grundlage von Vermessungsdaten gegeben werden, die dazu bisher nicht genutzt wurden.

Methodik und Ergebnisse der Gebäudebestandsanalysen werden in einem separaten Beitrag veröffentlicht. Erste indikatorbasierte Teilergebnisse sind bereits im Internet im Monitor der Siedlungs- und Freiraumentwicklung visualisiert (IÖR-MONITOR 2012). Jeweils vier Indikatoren mit unterschiedlichem Flächenbezug informieren dort über die Gebäudedichte (Gebäudeanzahl/km²) bzw. den Gebäudeüberbauungsgrad (Flächenanteil in %). Letzterer stellt neben versiegelten Freiflächen einen Teil der versiegelten Flächen dar.

Die erläuterten Datenaufbereitungen und nachfolgenden Gebäudebestandsanalysen sollen wiederholt und zukünftig Teil eines Monitorings der Siedlungsentwicklung werden. Dabei soll auch eine Gebäudeklassifikation auf Basis eines Forest-Tree-Klassifikators erfolgen, neue 3D-Gebäudedaten einbezogen und weiterführende Indikatoren, u. a. Geschossflächendichte, berechnet werden. Ab 2013 ver-

treibt das ZSHH auch zentralisiert 3D-Gebäudemodelle, vorerst LoD1-Klötzchenmodelle, der Katasterbehörden der Länder. Diese werden die Hausumringe um die Attribute Gebäudehöhe, Geschosshöhe und Gebäudefunktion ergänzen, was wesentlich genauere und weiterführende Gebäudebestandsanalysen ermöglichen wird. Mit der sukzessiven Vervollständigung der Attributwerte in ALKIS, die in den nächsten Jahren zu erwarten ist, wird sich die Datenlage zum Gebäudebestand noch weiter verbessern.

Abschließend soll hier die segensreiche Arbeit der AdV gewürdigt werden, die durch ihre Modellvorschriften erreicht hat, dass sich Eigenheiten, die aus der föderalen Struktur des amtlichen Vermessungswesens in Deutschland erwachsen, in Grenzen halten. Trotz der insgesamt hervorragenden Ergebnisse sind Unterschiede in den Datenprodukten unverkennbar und stellen immer wieder eine Herausforderung für vergleichende raum-zeitliche Analysen dar.

Danksagung

Für hilfreiche und vertiefende Informationen wird Frau KERSTIN WILL von der Zentralen Stelle für Hauskoordinaten, Hausumringe und 3D-Gebäudemodelle (ZSHH) und Herrn ALEXANDER HORN vom Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen gedankt.

Literatur

- AdV, 2008: GeoInfoDok – ALKIS: ALKIS-Objektartenkatalog. – Version 6.0, Stand: 11.4.2008, adv-online.de – AAA-Modell – Dokumente der GeoInfoDok (1.9.2013).
- ATKIS-OBJEKTARTENKATALOG, 2012: www.atkis.de/dstinfo.
- BBSR, 2011: Datenbasis Gebäudebestand. Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. – Abschlussbericht, 177 S., ISBN: 978-3-941140-16-5.
- BBSR, 2012: Systematische Datenanalyse im Bereich der Nichtwohngebäude – Erfassung eines Mengengerüsts und Quantifizierung von Energieeinspar- und CO₂-Minderungspotenzialen, SWD – 10.8.17.7-12.19.

- BMVBS, 2010: Typologie und Bestand beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland, BMVBS-Online-Publikation 16/11, 2011, <http://d-nb.info/1014856922/34> (1.9.2013).
- BMVBS, 2012: <http://www.bmvbs.de/shareddocs/de/artikel/sw/energetische-stadtsanierung.html> (22.10.2012).
- BMVBS, 2012: http://www.bmvbs.de/de/bauenundwohnen/energieeffizientegebaeude/gebaeudesanierung/gebaeudesanierung_node.html (17.10.2013).
- BURCKHARDT, M., 2012: Analyse des Gebäudebestandes in Deutschland auf Grundlage der Hausumringe (HU) und georeferenzierter Adressdaten. – Diplomarbeit, TU Dresden.
- DESTATIS, 2012: Statistisches Bundesamt. <http://www.destatis.de> (24.5.2012).
- EPBD, 2010: Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council, of 19 May 2010 on the energy performance of buildings.
- IÖR-MONITOR, 2012: Monitor der Siedlungs- und Freiraumentwicklung. – Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung, www.ioer-monitor.de (2.5.2012).
- SMI, 2011: Sächsisches Staatsministerium des Innern (SMI). Durchführungsverordnung zum Sächsischen Vermessungs- und Katastergesetz (SächsVermKatGDVO). – Fassung vom 6.7.2011. <http://revosax.sachsen.de/Details.do?sid=1752114717231> (4.3.2013).
- ZSHH, 2012: Bezirksregierung Köln, Abteilung ZSHH. Abgabe der Hausumringe und Hauskoordinaten, http://www.bezregkoeln.nrw.de/brk_internet/organisation/abteilung07/produkte/liegenschaftsinformation/hausinformationen/hausumringe/index.html (17.2.2012).

Anschriften der Autoren:

Dr. GOTTHARD MEINEL, Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung, Weberplatz 1, D-01217 Dresden, Tel.: +49-0351-4679254, Fax: +49-0351-4679212, e-mail: g.meinel@ioer.de

MANUEL BURCKHARDT, Regionaler Planungsverband Oberes Elbtal/Osterzgebirge, Meißner Straße 151a, D-01445 Radebeul, Tel.: +49-0351-40404721, Fax: +49-0351-40404740, e-mail: manuel.burckhardt@rpv-oeoe.de

Manuskript eingereicht: März 2013

Angenommen: Juli 2013



Integrated 3D Range Camera Self-Calibration

PATRICK WESTFELD & HANS-GERD MAAS, Dresden

Keywords: range imaging camera, integrated calibration, bundle adjustment, variance component estimation

Summary: An integrated bundle adjustment has been developed to facilitate the precise definition of the geometry of time-of-flight range imaging cameras, including the estimation of range-measurement-specific correction parameters modelling linear, periodic and sensor-position-dependent effects of a distance measurement. The integrated calibration routine jointly adjusts data from both information channels (amplitude and range) and automatically estimates optimum observation weights. The method is based on the flexible principle of self-calibration. It does not require spatial object data, thus avoiding the time-consuming determination of reference distances with superior accuracy. The accuracy analyses carried out using a PMD[vision]® CamCube 2.0 confirm the correctness of the proposed functional contexts, but they also exhibit challenges caused by non-parameterised range-measurement-specific errors. The level of accuracy of the observations is computed by variance component estimation and becomes in mean $1/35$ pixel for an amplitude image coordinate measurement and 9.5 mm for a distance measurement. The precision of a 3D point coordinate can be set at 5 mm after calibration, compared to several centimetres before applying any correction terms. In the case of depth imaging technology, which is influenced by a variety of noise sources, this accuracy level is very promising.

Zusammenfassung: *Integrierte Selbstkalibrierung distanzmessender 3D-Kameras.* Die entwickelte integrierte Bündelblockausgleichung ermöglicht die Bestimmung der exakten Aufnahmegeometrie distanzmessender 3D-Kameras sowie die Schätzung distanzmessspezifischer Korrekturparameter zur Modellierung linearer, periodischer und sensorpositionsabhängiger Fehleranteile einer Streckenmessung. Die integrierte Kalibrieroutine gleicht in beiden Informationskanälen (Amplitude und Distanz in jedem Pixel) gemessene Größen gemeinsam aus und bestimmt dabei simultan optimale Beobachtungsgewichte. Die Methode basiert auf dem flexiblen Prinzip der Selbstkalibrierung und benötigt keine Objektrauminformation, wodurch insbesondere die aufwändige Ermittlung von Referenzmaßen übergeordneter Genauigkeit entfällt. Die am Beispiel des PMD[vision]® CamCube 2.0 durchgeführten Genauigkeitsuntersuchungen bestätigen die Richtigkeit der aufgestellten funktionalen Zusammenhänge, zeigen aber auch Schwächen aufgrund noch nicht parametrisierter distanzmessspezifischer Fehler. Die durch eine Varianzkomponentenschätzung festgelegten Genauigkeitsniveaus der ursprünglichen Beobachtungen betragen im Mittel $1/35$ Pixel für die Amplitudenbildkoordinatenmessung und 9,5 mm für die Streckenmessung. Die Qualität der 3D-Neupunktkoordinaten kann nach einer Kalibrierung mit 5 mm angegeben werden. Im Vergleich bewegt sich diese ohne Anbringen von Korrekturtermen im Bereich einiger Zentimeter. Für die durch eine Vielzahl von meist simultan auftretenden Rauschquellen beeinflusste Tiefenbildtechnologie ist dieser Genauigkeitswert sehr vielversprechend.

1 Introduction

Modulation techniques enable range cameras based on photonic mixer devices or similar principles to simultaneously produce both an amplitude image and a range image. Though

monoscopic sensors, they deliver spatially resolved surface data at video rate without the need for stereo image matching, thus coming with the advantage of a considerable reduction in complexity and computing time.

The use of range cameras as measuring devices requires the modelling of deviations from the ideal projection model. As a result of its inherent design and measurement principle, range cameras simultaneously provide amplitude and range data reconstructed from one measurement signal. The simultaneous integration of all data obtained using a range camera into an integrated calibration approach is a logical consequence and represents the focus of this contribution. On the one hand, the complementary characteristics of the observations allow them to support each other due to the creation of a functional context for the measurement channels. On the other hand, the expansion of the stochastic model to include variance component estimation ensures that the heterogeneous information pool is fully exploited. An increase in accuracy and reliability can be expected by both.

The time-of-flight range imaging principle is introduced in section 2, including the sensor device, the measurement principle and the mathematical fundamentals of the range imaging process. Range cameras are subject to a variety of error sources, which affect both the optical imaging process itself and the distance measurement. Their origin and effects as well as different calibration strategies for correction are treated in section 3. The integrated self-calibrating bundle adjustment approach presented here and the results achieved are described in detail in sections 4 and 5. Finally, the work is summarised and an outlook is given in section 6.

2 Sensor

Time-of-flight range imaging cameras (ToF, RIM, 3D camera; SCHWARTE et al. 1999) are monoscopic digital cameras. They acquire amplitude and range images simultaneously. An active illumination unit emits modulated near infrared light, which is backscattered from the object surface to the camera. The solid-state sensor array mounted is a photonic mixer device built in CCD/CMOS technology (PMD, SPIRIG et al. 1995, SCHWARTE 1996). At each detector pixel, a distance-based charge carrier separation is performed. This demodulation delivers the phase difference between

the emitted and the received signals, and consequently the range from the camera's projection centre to the target. Furthermore, amplitude information as a measure for i.a. the reflectivity of the corresponding surface points can be obtained.

In the field of RIM sensor technology, ToF-based cameras are currently available with a sensor size of up to 40,000 pixels. Each pixel thus becomes an electro-optical distance-measuring device. Low-cost, compact range cameras combine the practicality of a digital camera with the 3D data acquisition potential of conventional surface measurement systems. Thus, they represent an interesting alternative for many applications such as mobile robotics (SCHULZE 2010, MÖNNICH et al. 2011), human-machine-interaction (KOLB et al. 2010), automotive (RINGBECK et al. 2007, REICH 2011), or human motion analysis (WESTFELD & HEMPEL 2008, WESTFELD et al. 2013).

The imaging geometry of a range camera is similar to a conventional 2D camera (Fig. 1). The collinearity equations map an object point $\mathbf{X}(X,Y,Z)$ to an image point $\mathbf{x}'(x',y')$ using a central projection:

$$\begin{aligned} x' &= x'_0 \\ &- c \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} \\ &+ \Delta x' \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} y' &= y'_0 \\ &- c \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} \\ &+ \Delta y' \end{aligned}$$

where

c :	Focal length
$\mathbf{x}'_0$:	Principal point
$\Delta \mathbf{x}'$:	Correction functions
$\mathbf{X}_0$:	Projection centre
$r_{r,c}$:	Elements of a rotation matrix $\mathbf{R}$

In addition to amplitude information, range values D are stored in each pixel location. Due to this fact, the inverse mapping, i.e. the projection of an image point into object space, is uniquely defined and can be described by:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + (D - \Delta D) \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \cdot \frac{\xi'}{\|\xi'\|} \quad (2)$$

where

$$\xi' = \begin{pmatrix} x' - x'_0 - \Delta x' \\ y' - y'_0 - \Delta y' \\ -c \end{pmatrix}.$$

$\Delta \mathbf{x}'(\Delta x', \Delta y') = f(A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, C_1, C_2)$ describes functions for the correction of imaging errors. The additional parameters implemented compensate radial ($A_1 - A_3$) and tangential (B_1, B_2) distortions using the well-established model from (BROWN 1971) as well as affinity and shear effects (C_1, C_2 ; EL-HAKIM 1986). The distance correction term ΔD should consider systematic errors in the range measurements (section 3).

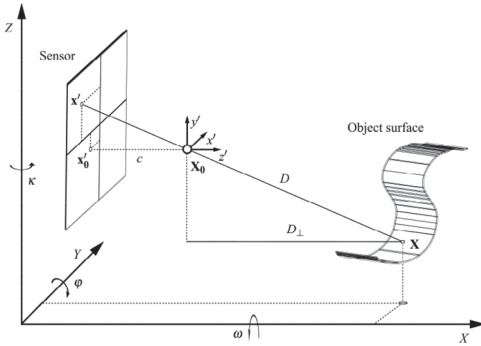


Fig. 1: Imaging geometry.

3 Error Sources and Calibration Strategies

Range cameras use standard optics for imaging. Thus, the measurement geometry corresponds to a central projection (section 2), and any deviations from the ideal model have to be compensated. Photogrammetric camera calibration techniques are employed to determine actual values for the focal length c and the principal point $\mathbf{x}'_0$ as well as for the parameters describing lens distortion and other errors, summarised in $\Delta \mathbf{x}'$.

The results of the distance measurements are also affected by a number of error sources:

Effects caused by temperature and run-in behaviour or multipath propagation can be decreased or even avoided by an adequate measurement setup. Fixed pattern noise (FPN) specifies a constant distance measurement error at each pixel location and is caused by inhomogeneous CMOS material properties (JÄHNE 2002). Look-up tables or multiple signal sampling implemented by range camera manufacturers are used to compensate FPN effects in real-time (LUAN 2001). ToF cameras acquire four raw measurements successively in order to calculate one phase image. Any sensor or object movement occurring between those sampling steps leads to motion artefacts due to phase changes (e.g. LINDNER & KOLB 2009). Current range camera devices can suppress motion blur on-chip (RINGBECK & HAGEBEUKER 2007). Scattering (lens flare) describes the internal propagation of the incident light over the PMD array caused by signal reflections between optical filter, lens and sensor. Approaches to model the superimposition of focused light with scattered portions by point spread functions are for example given in MURE-DUBOIS & HÜGLI (2007) or KAREL et al. (2012). LICHTI et al. (2012) propose an empirical parameterised model to compensate for scattering-induced range errors, which is only valid under specific scene conditions. A linear distance correction term considers a shift d_0 of the measurement origin, the latter being defined to coincide with the projection centre (Fig. 2), and a scale variation d_1 caused by modulation frequency deviations:

$$\Delta D_{lin} = d_0 + d_1 D \quad (3)$$

The modulation of the measurement signal can be influenced by harmonic interferences. A periodic distance correction term approximates the resulting cyclic phase errors (e.g. LICHTI et al. 2010). The wavelengths e.g. of two sinusoidal functions with d_3 and d_5 as amplitudes correspond to $1/4$ and $1/8$ of a constant modulation wavelength λ ; phase shifts are considered by the cosine parts with d_2 and d_4 as amplitudes:

$$\Delta D_{cyc} = d_2 \cos\left(4 \frac{2\pi}{\lambda} D\right) + d_3 \sin\left(4 \frac{2\pi}{\lambda} D\right) + d_4 \cos\left(8 \frac{2\pi}{\lambda} D\right) + d_5 \sin\left(8 \frac{2\pi}{\lambda} D\right) \quad (4)$$

Phase shifts can occur due to delays in signal propagation (FUCHS & HIRZINGER 2008) or high viewing angles (BÖHM & PATTINSON 2010). A linear function of the radial distance r' using a factor d_6 can be introduced to correct a distance measurement with respect to the position on the sensor:

$$\begin{aligned}\Delta D_{x',y'} &= d_6 r' \\ &= d_6 \sqrt{(x' - x'_0 - \Delta x')^2 + (y' - y'_0 - \Delta y')^2}\end{aligned}\quad (5)$$

The amplitude demodulated at each sensor site is a measure for the total amount of incident light. KAREL & PFEIFER (2009) show that a measured distance increases with decreasing reflectivity and model the influence of the amplitude A on the ranging system by a hyperbola with parameters $d_7 - d_9$:

$$\Delta D_{amp} = -\frac{d_7}{d_8} A + \sqrt{\frac{d_7^2}{d_8^2} A^2 - 2 \frac{d_9}{d_8} A + \frac{1}{d_8}} \quad (6)$$

Several calibration strategies are reported in literature to correct the errors described above. Depending on the observations used, they can be categorized as photogrammetric, sequential and simultaneous methods (WESTFELD 2012). A classical photogrammetric test field calibration only determines the interior orientation parameters from amplitude images, e.g. REULKE (2006), WESTFELD (2007), BEDER & KOCH (2008). Sequential approaches go one step further and calibrate the distance measurement after photogrammetric calibration. The required reference is derived from interferometric comparator displacement measurements (KAHLMANN et al. 2006), precise external positioning systems, e.g. a robot (FUCHS & HIRZINGER 2008), or optical tracking systems like a laser scanner (CHIABRANDO et al. 2009). Reference values can also be provided indirectly by the network geometry determined in the course of the self-calibration (KAREL 2008, ROBBINS et al. 2009, BÖHM & PATTINSON 2010), a procedure which reduces time and instrumental effort significantly. A logical extension of the 2-step calibration is the simultaneous determination of all calibration parameters in one integrated self-cal-

ibrating bundle adjustment approach. Initial thoughts about the combination of heterogeneous ToF camera observations in one adjustment procedure were published in WESTFELD (2007). WESTFELD et al. (2009) move a small reference body with white spherical signals through the measurement volume of a range camera. Interior camera orientation parameters and distance calibration terms are estimated within a test-field-calibrating bundle adjustment with fixed object point coordinates. Variance component estimation ensures that the heterogeneous information pool is fully exploited. However, the experimental effort of this study was still high, because the central points of the spheres have to be determined at each position of the calibration body. LICHTI et al. (2010) and LICHTI & QI (2012) perform a geometric calibration of range cameras by means of an integrated self-calibrating bundle adjustment from measurements of an 8 m² planar target field, signalled with circles. The centres of the targets in the amplitude images are measured by ellipse fitting, the corresponding range measurements must be derived from the neighbourhood by bilinear interpolation. Due to the special characteristics of the experimental setup, the distance correction model does not comprise a scale error term. LICHTI et al. (2012) extend the approach to compensate the scattering bias using a specific two-plane target.

4 Integrated Self-calibrating Bundle Adjustment

4.1 Principle

With respect to the calibration strategies reviewed in section 3, the integrated bundle adjustment approach presented here should hold the following properties: 1) The primary aim is to simultaneously integrate all range camera information in one joint functional and stochastic context. 2) To reduce efforts in time and instrumental resources, the method is based on self-calibration. 3) If possible, the observations should not be interpolated. 4) The target field is stable, compact, portable as well as easy in set-up and dismantle.

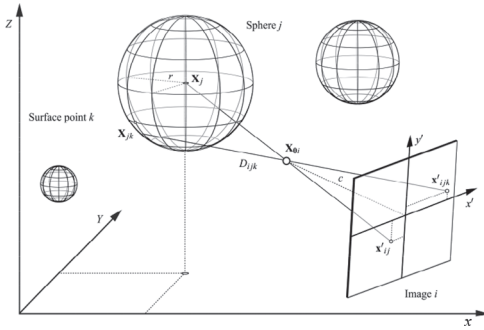


Fig. 2: Geometric model: For each range camera image i , a sphere j is projected onto the image plane. For each surface point k , amplitude information gv_{ijk} and range value D_{ijk} are stored at $(x', y')_{ijk}$.

The geometric principle of the calibration approach is shown in Fig. 2. Spheres serve as 3D reference objects. Their centres can be measured easily in the amplitude images, but the corresponding slant range measurements cannot be derived directly from range images. In order to set the geometric relation between both observation channels and to avoid range value interpolation, spheres are modelled by their surface points. Thus, the geometric model is based on the collinearity of the centre coordinates $\mathbf{x}'_{ij}$ of a sphere j observed in image i , the projection centre $\mathbf{X}_{0i}$ and the corresponding object point $\mathbf{X}_j$. In addition, the integer im-

age positions $\mathbf{x}'_{ijk}$ and the stored slant ranges D_{ijk} of all sphere surface points k are used. So the geometric model for distances is based on the intersection points $\mathbf{X}_{jk}$ of the projection rays with the surface of a sphere.

4.2 Functional Model

Amplitude Channel

The centre coordinates of the reference spheres projected onto the sensor can be measured with sub-pixel accuracy in each amplitude image by 2D least squares template matching (LSM), e.g. ACKERMANN (1984), GRÜN (1985). The template is generated automatically prior to the image matching process with respect to the amplitude gradient and the dimension of the relevant sphere (Figs. 3a and 3b). 2D LSM is parameterised by two shifts in row and column and one scale only. The approximate values originate from an algorithm for automatic image point detection based on edge detection, thresholding and connectivity analysis (BURKHART 2007). Furthermore, a student test has been implemented for testing the LSM parameters' level of significance. The mean standard deviation of the image point coordinates is $1/25$ pixel (Fig. 3c).

The image points $\mathbf{x}'_{ij}$, measured in amplitude images i , form the first type of observa-

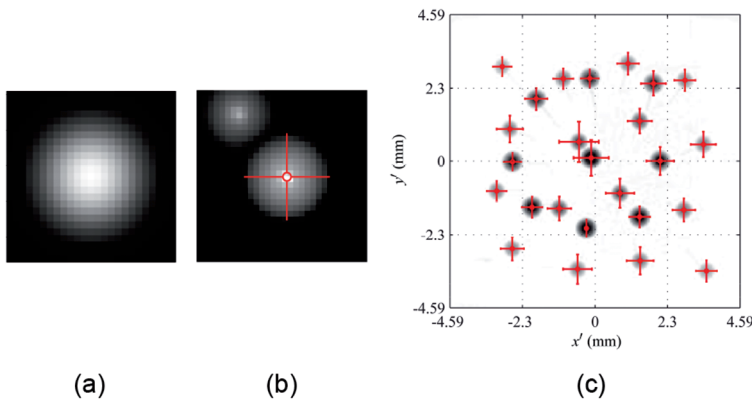


Fig. 3: Amplitude image point measurement by 2D LSM. (a) Synthetically generated reference image. (b) Search image with centre cross. (c) Exemplary plot of the a-posteriori standard deviations of the translation parameters based on a single inverse amplitude image. Averaged over all images, the deviations are $1/25$ pixel or $1.70 \mu\text{m}$ with a sensor size of $9.18 \text{ mm} \times 9.18 \text{ mm}$ (exaggeration: 200).

tion introduced into the bundle adjustment. On the basis of the collinearity equations (1), two observation equations $\Phi^{Ax'}$ and $\Phi^{Ay'}$ can be formulated per target j :

$$\begin{aligned} x'_{ij} &= \\ \Phi_{ij}^{Ax'}(X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}, \omega_i, \varphi_i, \kappa_i, x'_{0i}, c, \Delta x', X_j, Y_j, Z_j) \\ y'_{ij} &= \\ \Phi_{ij}^{Ay'}(X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}, \omega_i, \varphi_i, \kappa_i, y'_{0i}, c, \Delta y', X_j, Y_j, Z_j) \end{aligned} \quad (7)$$

Range Channel

A range measurement is performed at each detector site. Thus, and in contrast to the amplitude image point measurements, ToF cameras deliver those observations directly for each sensor element. The distances measured between camera optics and sphere surfaces serve as the second observation type. The task is to automate the segmentation of the observed range values for each sphere.

The centre coordinates obtained from 2D LSM are used to localize the spheres in amplitude and range images. One patch applied to both amplitude and range image is cut out centred at the location of the target determined in the amplitude image, with the patch size depending on the sphere distance. All pixels within this patch are considered to be possible candidates for points on the sphere (Fig. 4a). In the next step, an amplitude threshold dynamically derived by fitting a Gaussian to the histogram of the amplitude image

is applied (Fig. 4b). Starting in the centre of the range patch, a radial profile analysis based on neighbouring range value differences is performed for further patch containment (Fig. 4c). A range threshold, which originates from the profile analysis, is applied afterwards (Fig. 4d). RANSAC (random sample consensus, FISCHLER & BOLLES 1981) is used to estimate the parameters of a sphere in order to eliminate gross errors, primarily caused by oversaturation or multi-path effects at object boundaries, and finally calculates the initial set of observations (Fig. 4e). In this process, the probability of a randomly selected data item being part of a sphere model is 99 %. The error tolerance for establishing the sphere model compatibility is equal to the known sphere radius. After segmentation and with respect to the experimental setup described in section 5.1, one sphere surface is on average represented by 100 points (min.: 11, max.: 261). A detailed description of the segmentation workflow is given in WESTFELD (2012).

The surface points $\mathbf{X}_{jk}$ of a sphere j , with centre $\mathbf{X}_j$ and radius r , have been segmented from ToF images i . They satisfy the following general equation of a sphere:

$$0 = (X_{jk} - X_j)^2 + (Y_{jk} - Y_j)^2 + (Z_{jk} - Z_j)^2 - r^2 \quad (8)$$

Substituting $\mathbf{X}_{jk}$ in (8) by the right hand side of (2) geometrically corresponds to a spatial intersection of a projection ray with the surface of the sphere:

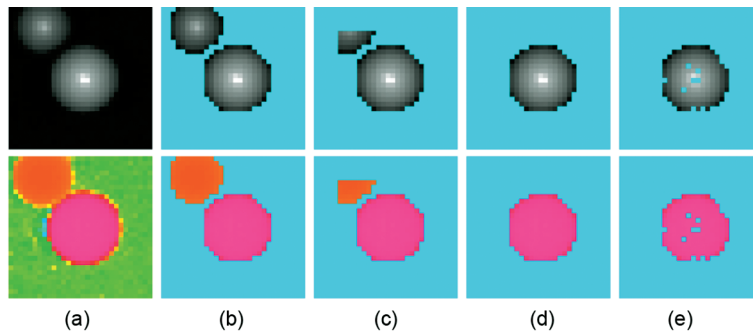


Fig. 4: Sphere segmentation stages in amplitude images (top) and colour-coded range images (bottom). Non-valid pixels are coloured in Cyan, (a) rough localization, (b) histogram analysis in amplitude image, (c) profile analysis in range image, (d) thresholding in range image, (e) Inliers of the RANSAC procedure.

$$\begin{aligned}
0 = & \left[X_{0i} - X_j + (D + \Delta D)_{ijk} \cdot (r_{1i} \xi'_{1ijk} + r_{12i} \xi'_{2ijk} + r_{13i} \xi'_{3ijk}) \right]^2 \\
& + \left[Y_{0i} - Y_j + (D + \Delta D)_{ijk} \cdot (r_{21i} \xi'_{1ijk} + r_{22i} \xi'_{2ijk} + r_{23i} \xi'_{3ijk}) \right]^2 \\
& + \left[Z_{0i} - Z_j + (D + \Delta D)_{ijk} \cdot (r_{31i} \xi'_{1ijk} + r_{32i} \xi'_{2ijk} + r_{33i} \xi'_{3ijk}) \right]^2 - r^2
\end{aligned} \quad (9)$$

Finally, (9) is solved for D and introduced as observation equation into the bundle adjustment.

rotations as well as all 3D sphere centres $\mathbf{X}_j$ need to be determined in the integrated bundle adjustment. The sphere radius r is introduced as a constant.

Additional Constraints

A 3D rotation can be described by three Euler angles (ω, ϕ, κ) or, in order to avoid ambiguous trigonometric functions, by four quaternions (q_1, q_2, q_3, q_4) . The use of quaternions makes sense from a numerical point of view but requires one additional equation per camera position i to enforce an orthogonal rotation matrix $\mathbf{R}_i$:

$$1 = q_{1i}^2 + q_{2i}^2 + q_{3i}^2 + q_{4i}^2 \quad (10)$$

The reference frame of the integrated self-calibrating bundle approach is not uniquely defined by known reference points and should be adjusted as an unconstrained network. The rank defect of the resulting singular system of equations can be removed by including seven additional constraints: 3 translations, 3 rotations, 1 scaling factor, e.g. LUHMANN et al. (2006). The scale was determined by two diagonal reference distances across the target field.

Unknown Parameters

The unknown range camera calibration parameters are the focal length c , the principal point $\mathbf{x}'_0$ and the parameters of the image correction functions $\Delta \mathbf{x}'$ (interior orientation parameters) as well as linear, periodic and radial distance correction terms, summarised in ΔD :

$$\Delta D = \Delta D_{lin} + \Delta D_{cyc} + \Delta D_{x'y'} \quad (11)$$

They can be estimated from the observation equations (7) and (9). Reflectance dependencies cannot be modelled reliably due to the use of white spheres as reference objects.

Further, exterior orientation parameters $\mathbf{X}_{0i}$ and $(q_1, q_2, q_3, q_4)_i$ for camera translations and

4.3 Stochastic Model

The stochastic model contains information about the accuracy of the functional model, especially the weighting of the observations. It is represented by the variance-covariance matrix Σ_{ll} of the observations before the adjustment process. Datasets with different types of observations should be separated into groups, and weights should be adjusted in order to tap the full information potential. Usually, information from the instrument manufacturer or from previous accuracy analyses provide the basis for specifying the a-priori variance of a measurement.

The integrated calibration method combines heterogeneous observations with unknown accuracy. The a-priori variance components are adjusted automatically by iterative variance component estimation (VCE). The weights of the observations are given by the quotient of s_0^2 to s_i^2 . The variance of the unit weight s_0 is a constant (in general $s_0 = 1$), and s_i are the variances of the observations, namely the variance component s_A^2 for the amplitude image point measurements and s_D^2 for the range measurements. WESTFELD & HEMPEL (2008) already show that an aggregation of all observations of one group with one (adaptive) weight is acceptable for a ToF camera. Σ_{ll} can be subdivided into two components, i.e., one component per group of observation:

$$\Sigma_{ll} = \begin{bmatrix} \Sigma_A & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Sigma_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_A^2 \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & s_D^2 \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (12)$$

where $\mathbf{I}$: Identity matrix

In the course of the VCE, the approximate values for the variance components are improved within a few iterations. See KOCH (2004) for further information. The remaining additional constraints are considered to be mathematically rigorous by $\mathbf{P}_C = \mathbf{0}$ in the extended system of normal equations (SNOW 2002, section 4.4).

4.4 Solving the Adjustment Task

The integrated bundle adjustment bases on an extended Gauß-Markov model:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l} &= \mathbf{v}; & \mathbf{B}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{w} &= \mathbf{0} \\ \mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} + 2\mathbf{k}^T (\mathbf{B}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{w}) &\rightarrow \min \\ \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \mathbf{k} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} & \mathbf{B}^T \\ \mathbf{B} & -\mathbf{P}_C^{-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} \\ \mathbf{w} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

where $\mathbf{v}$: Residuals

$\mathbf{k}$: Lagrangian multipliers

The functional model (section 4.2) is required to set up the coefficient matrices $\mathbf{A}$ and $\mathbf{B}$, which contain the linearised observation and constraint equations, the reduced observation vector $\mathbf{l}$ and the vector of inconsistencies $\mathbf{w}$. The weight matrix $\mathbf{P}$ as inverse variance-covariance matrix Σ_{ll} defines the stochastic model (section 4.3). The extended system of normal equations is solved iteratively. At each step, the solution vector $\hat{\mathbf{x}}$ is added to the approximation values of the previous iteration until the variances reach a minimum and the optimisation criterion is fulfilled.

As a least squares adjustment method, the integrated bundle adjustment delivers information on the precision, determinability and reliability of the calibration parameters. This includes the a-posteriori variance $\hat{s}_i$ of each of the parameters as well as the correlation between parameters. In combination with an automatic VCE, a-posteriori variances $\hat{s}_i$ and $\hat{s}_j$ of the original and adjusted observations can be stated.

The ratio between the a-posteriori standard deviation $\hat{s}_{v_i}$ of the residuals and the actual residual $\hat{v}_i$ of an observation serves as reliability measure. Per group, the observation with the largest normalised residual above a pre-

set threshold is rejected, and the adjustment is repeated until no gross error remains (data snooping).

A student test is calculated after the solution converges to decide whether an introduced parameter is significant or not. Non-significant parameters may be excluded from the estimation process in order to improve the strength of the solution. The least squares adjustment is repeated until all used parameters are significant.

5 Results

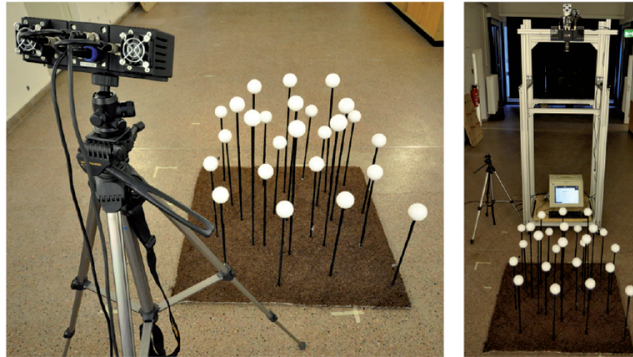
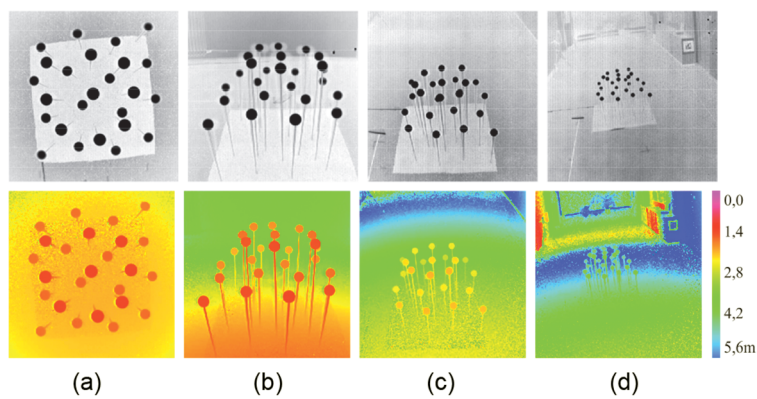
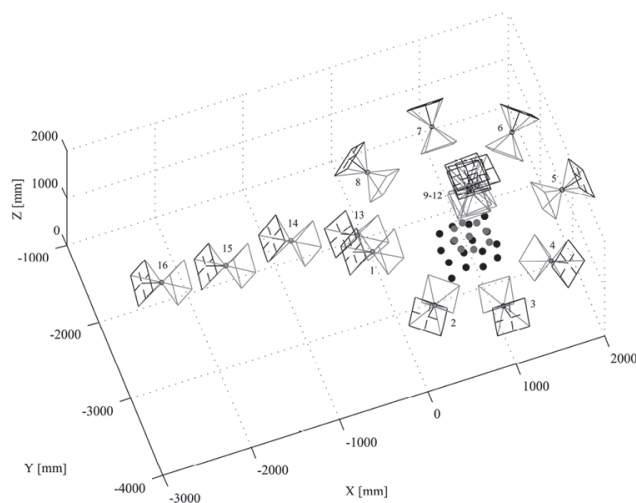
5.1 Experimental Setup

A 1 m² rigid 3D calibration target field was designed in order to proof the concept presented here (Fig. 5). It consists of 25 white polystyrene spheres with a radius r of 35 mm, aligned in two depth planes. The spatial point field with roughly known geometry was captured by a PMD[vision]® CamCube 2.0 (Fig. 6, focal length 12.8 mm, field of view 40° × 40°) following the imaging configuration shown in Fig. 7. The integration time was set to 2,000 µs. The modulation frequency was set to 20 MHz, which corresponds to a non-ambiguous measurement range of 7.5 m. Overall 12 convergent images, four of them rolled against the camera axis, ensure improved ray intersections and lower parameter correlations. A further four camera positions in distances of up to 5 m allow for the determination of distance-related correction terms. Images in larger distances cannot be oriented reliably.

5.2 Internal Accuracy

Calibration Parameters

Tab. 1 lists the interior orientation parameters and the corresponding a-posteriori standard deviations. All parameters could be determined significantly, except for the radial distortion parameters A_2 and A_3 . Tab. 1 further lists the distance correction terms, and Fig. 8 shows their influence depending on sensor position and distance value. The additive term d_0 of ΔD_{lin} is 115 mm, the multiplicative param-

**Fig. 5:** Target field.**Fig. 6:** Inverse amplitude images (top) and colour-coded range images (bottom) as input data. (a) Frontal view. (b – d) Oblique views at a distance of 1.5 m to 4.5 m.**Fig. 7:** Network geometry.

Tab. 1: ToF camera calibration parameters $\hat{x}_i$ with their standard deviations $\hat{s}_{\hat{x}_i}$.

	c (mm)	x_0' (mm)	y_0' (mm)	A_1	A_2	A_3	B_1	B_2	C_1	C_2
$\hat{x}_i$	12.149	-0.151	-0.258	$-2.85e^{-3}$	0	0	$3.55e^{-4}$	$7.02e^{-4}$	$7.26e^{-4}$	$-2.32e^{-4}$
$\hat{s}_{\hat{x}_i}$	$6.48e^{-3}$	$8.97e^{-3}$	$8.59e^{-3}$	$1.29e^{-5}$	fix	fix	$2.38e^{-5}$	$2.38e^{-5}$	$8.78e^{-5}$	$6.90e^{-5}$

	d_0 (mm)	d_1	d_2 (mm)	d_3 (mm)	d_4 (mm)	d_5 (mm)	d_6
$\hat{x}_i$	-115.82	$2.88e^{-2}$	-33.18	23.98	-8.56	-2.89	3.17
$\hat{s}_{\hat{x}_i}$	15.38	$6.33e^{-3}$	5.31	4.44	2.09	1.04	0.32

eter d_1 amounts to 2.8 % of the measured distance. The amplitudes $d_{[2,5]}$ of the sinusoidal correction function ΔD_{cyc} show about ± 45 mm wave deflection in maximum. The radial factor d_6 in of $\Delta D_{x'y'}$ causes a correction of up to 20 mm for distance measurements at the image corners.

The individual a-posteriori standard deviations of all distance correction parameters seem to be quite high. However, an interpretation is difficult due to non-parameterised remaining errors like scattering or reflectance. Reducing the error model to only a linear correction term would increase the internal accuracy by one order of magnitude ($d_0 = -94.13 \text{ mm} \pm 1.235 \text{ mm}$; $d_1 = -1.29e^{-2} \pm 6.29e^{-4}$), but concurrently increase the distance residuals by more than 5 mm.

The not fully parameterised distance error model also results in high correlations of about 0.90 between all distance correction parameters summarised in ΔD_{lin} and ΔD_{cyc} . The correlations between the other parameters were relatively low. Further considerable cor-

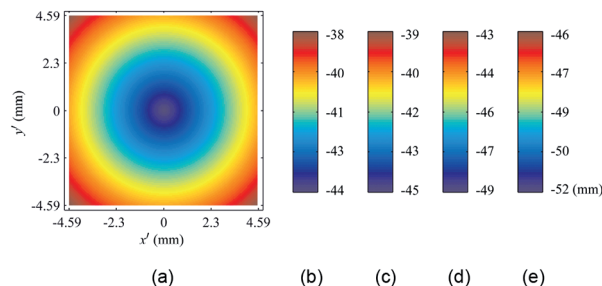
relations could not be observed. Particularly, no significant correlations between the interior and exterior orientation parameters and the distance correction parameters could be observed. These correlation coefficients range from $-0.07 - +0.09$ and from $-0.13 - +0.10$, respectively.

3D Object Coordinates

The a-posteriori standard deviations of the sphere surface points $\mathbf{X}_{jk}$ observed from one camera position is 0.32 mm; with the redundancy the RMS is improved to 0.13 mm for the sphere centre coordinates $\mathbf{X}_j$.

Residuals

The normally distributed residuals v_A of the amplitude image coordinate measurements $\mathbf{x}_{ij}'$ do not show any systematic effect. They vary in both coordinate directions with an a-posteriori RMS deviation $\hat{s}_{v_i}$ about $1/40$ pixel around the expected value $\mu = -0.06 \text{ } \mu\text{m}$ (Fig. 9a).

**Fig. 8:** (a) Effects of the distance correction term on sensor positions, (b) in image distances of 1.0 m, (c) 2.0 m, (d) 3.0 m, and (e) 4.0 m.

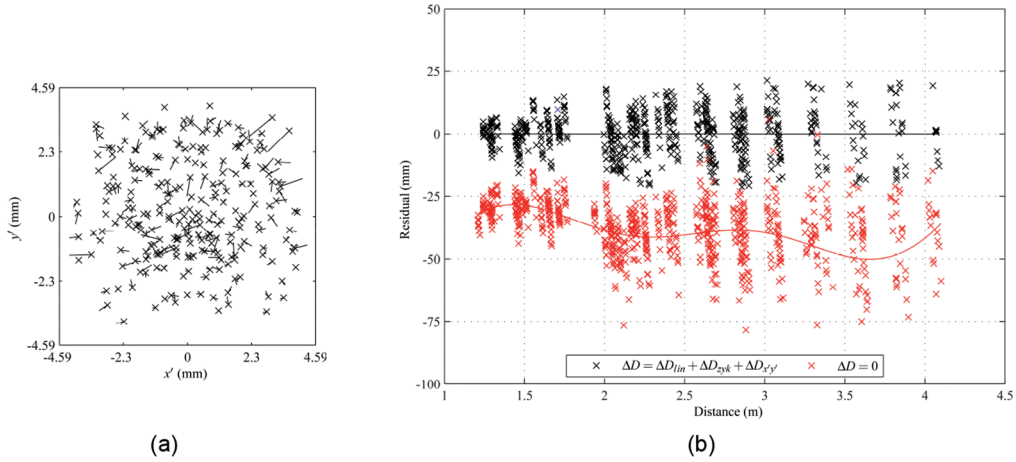


Fig. 9: Residuals of the amplitude image coordinate measurements show no systematic effects and are normally distributed around $-0.06 \mu\text{m}$ with an RMS error of $1/40$ pixel (exaggeration: 200). (b) Residual of the distance measurements without correction show systematic effects (red). The RMS error is 40.86 mm. The residuals do not show interpretable effects, if distance correction terms are included (black). The RMS error can be reduced significantly to 6.49 mm.

The remaining residuals v_D of the distance observations are shown in Fig. 9b for an adjustment with and without considering the distance correction model. The red graph results from a function fitted into the residuals of the uncorrected distance measurements. It indicates a constant offset, a slight distance-related trend and periodic variations. As expected, the RMS of the residuals is at a height of 40.86 mm. The deviations can be reduced significantly, if distance correction terms are estimated and added. The black graph of a function fitted into the remaining residuals after a fully parameterised adjustment is nearly a straight line with $y = 0 = \text{const}$. This is also confirmed by the normally distributed residuals around the expected value $\mu = 0.65 \text{ mm}$. The RMS error can be reduced by a factor 6 to 6.49 mm.

Observational Errors

The a-posteriori standard deviations $\hat{s}_{A,D}$, the observations estimated by the VCE as well as the $\hat{s}_{A,D}$ of the adjusted observations were calculated in the course of the error analysis after the bundle adjustment (Tab. 2).

In average, the a-posteriori standard deviation $\hat{s}_A$ of an image coordinate measurement

becomes $1/35$ pixel, and is thus slightly better than the LSM precision stated in section 4.2. The average deviation of an original distance measurement is about 9.5 mm. This value corresponds to the level of precision determined from repeated measurements in preliminary investigations (HEMPEL 2007). The a-posteriori standard deviation of the unit weight is near to the a-priori constant value $s_0 = 1.0$, which indicates an optimally determined accuracy ratio for both groups of observations. This implies that the a-posteriori variances of the original observations are equal to their a-priori variances.

The standard deviations $\hat{s}_A$ and $\hat{s}_D$ of the adjusted observations, without any systematic errors, are $1/70$ pixel for the image coordinate measurement and about 0.8 mm for the distance measurement.

Tab. 2: A-posteriori standard deviations $\hat{s}$ of the original and adjusted observations as well as of the unit weight.

$\hat{s}_A$	$\hat{s}_{\hat{A}}$	$\hat{s}_D$	$\hat{s}_{\hat{D}}$	$\hat{s}_0$
1.23 μm	0.65 μm	9.468 mm	0.794 mm	1.00002

5.3 External Accuracy

The remaining random measurement deviations and the observational errors as internal precision measures confirm the correctness of the proposed functional and stochastic contexts, but do not reflect the actual physical measurement accuracy.

Images of the target field, captured by a DSLR Nikon D300 and processed by photogrammetric bundle adjustment, are used to obtain 3D sphere centre coordinates with superior accuracy. Such reference data can be used to specify the absolute or external accuracy of the integrated calibration method proposed. The root-mean-square error of the coordinate differences is $RMS_{\Delta X} = 5.3$ mm, the minimum deviation is 0.4 mm, the maximum deviation is 10.7 mm.

5.4 Comparison of 1- and 2-step Procedures

In order to evaluate the advantages of the integrated approach, the dataset is processed again on the basis of a 2-step calibration. The amplitude image coordinate measurements are introduced into a bundle adjustment, which is only parameterised by the interior and exterior orientation parameters as well as with the 3D sphere centres. Based on this network geometry, the distance correction terms are estimated afterwards by adjusting the range data. The differences in orientation parameter values as well as their accuracies and correlations are marginal. The distance parameter values vary, but their sum ΔD shows a high degree of correspondence. Only the residual analysis shows significant improvements: The RMS deviations $\hat{s}_{A,D}$ of the remaining residuals $v_{A,D}$ decrease by 15 % for the integrated approach, and the expected values tend more clearly towards zero. Finally, the RMS of the coordinate differences ΔX can be improved slightly by 5 % and thus confirm that the integrated bundle adjustment approach is better suited to model the geometric-physical reality of ToF range imaging process.

A detailed comparison of the three different self-calibration methods for range cameras and the advantages of an integrated self-cal-

ibration method in particular are discussed in LICHTI & KIM (2011).

6 Conclusion and Outlook

The self-calibrating bundle adjustment approach presented in this contribution determines a geometric range camera model and estimates all image- and distance-related correction parameters. The parameterisation combines both amplitude and distance measurements in an integrated functional model. The heterogeneous information pool is fully exploited by estimating variance components automatically within the integrated stochastic model. The experimental configuration of the self-calibration is based on a small, portable target field, whose geometry is determined simultaneously in the adjustment. Complex experimental set-ups can thus be avoided. The process validation showed that the integration of complementary data leads to a more accurate solution than a 2-step calibration. The RMS error of a 3D coordinate can be stated with 5 mm after the calibration.

Future work can concentrate on an improved experimental setup with grey-scale reference spheres in order to model the dependence of the distance measurements on reflectance. The integration time has an influence on the distance measurements, too. Thus, the calibration should be performed for different integration times. In order to define the scale, two bars of known length, each with two spheres at both ends, can be used as a flexible reference length in object space. As soon as effects of remaining error sources such as scattering are investigated in a strict geometric-physical manner, the parameterisation of the distance correction model can be adapted. To differentiate between constant and distance-related measurement errors, the integration of adaptive variance components is also possible. Finally, the temporal stability of the calibration parameters should be examined and a comparison of different range camera devices should be carried out.

References

- ACKERMANN, F., 1984: High precision digital image correlation. – 39th Photogrammetric Week **9**: 231–243, Schriftenreihe der Universität Stuttgart.
- BEDER, C. & KOCH, R., 2008: Calibration of focal length and 3D pose based on the reflectance and depth image of a planar object. – *International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications* **5** (3/4): 285–294.
- BÖHM, J. & PATTINSON, T., 2010: Accuracy of exterior orientation for a range camera. – MILLS, J.P., BARBER, D.M., MILLER, P. & NEWTON, I. (eds.): *ISPRS Commission V Mid-Term Symposium 'Close Range Image Measurement Techniques'* **XXXVIII**: 103–108.
- BROWN, D.C., 1971: Close-range camera calibration. – *Photogrammetric Engineering* **37** (8): 855–866.
- BURKHART, S., 2007: Automatische Messung kreisförmiger Ziellmarken. – Unveröffentlichte Studienarbeit, Technische Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung.
- CHIABRANDO, F., CHIABRANDO, R., PIATTI, D. & RINAUDO, F., 2009: Sensors for 3D imaging: Metric evaluation and calibration of a CCD/CMOS time-of-flight camera. – *Sensors* **9** (12): 80–96.
- EL-HAKIM, S., 1986: A real-time system for object measurement with CCD cameras. – *IAPRS* **26**.
- FISCHLER, M.A. & BOLLES, R.C., 1981: Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. – *Communications of ACM* **24** (6): 381–395.
- FUCHS, S. & HIRZINGER, G., 2008: Extrinsic and depth calibration of ToF-cameras. – *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* **2008**: 1–6.
- GRÜN, A., 1985: Adaptive least squares correlation – a powerful image matching technique. – *South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography* **14**: 175–187.
- HEMPEL, M., 2007: Validierung der Genauigkeit und des Einsatzpotentials einer distanzmessenden Kamera. – Unveröffentlichte Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung.
- JÄHNE, B., 2002: *Digitale Bildverarbeitung*. – 5. Auflage, Springer-Verlag, Berlin und Heidelberg.
- KAHLMANN, T., REMONDINO, F. & INGENSAND, H., 2006: Calibration for increased accuracy of the range imaging camera swissrangertm. – MAAS, H.-G. & SCHNEIDER, D. (eds.): *ISPRS Image Engineering and Vision Metrology* **XXXVI** (5): 136–141, ISSN 1682-1750.
- KAREL, W., 2008: Integrated range camera calibration using image sequences from hand-held operation. – *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **XXXVII**: 945–951.
- KAREL, W. & PFEIFER, N., 2009: Range camera calibration based on image sequences and dense, comprehensive error statistics. – BERALDIN, A., CHEOK, G.S., MCCARTHY, M. & NEUSCHAEFER-RUBE, U. (eds.): *SPIE Proceedings on Electronic Imaging / 3D Imaging Metrology* **7239**, San José, CA, USA.
- KAREL, W., GHUFFAR, S. & PFEIFER, N., 2012: Modelling and compensating internal light scattering in time of flight range cameras. – *Photogrammetric Record* **27**: 155–174.
- KOCH, K.-R., 2004: Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen. – 4. Auflage, Dümmlers Verlag, Bonn.
- KOLB, A., BARTH, E., KOCH, R. & LARSEN, R., 2010: Time-of-flight cameras in computer graphics. – *Computer Graphics, Forum* **29** (1): 141–159.
- LICHTI, D.D., KIM, C. & JAMTSH, S., 2010: An integrated bundle adjustment approach to range camera geometric self-calibration. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **65** (4): 360–368.
- LICHTI, D.D. & KIM, C., 2011: A Comparison of Three Geometric Self-Calibration Methods for Range Cameras. – *Remote Sensing* **3**: 1014–1028.
- LICHTI, D.D., QI, X. & AHMED, T., 2012: Range camera self-calibration with scattering compensation. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **74**: 101–109.
- LICHTI, D.D. & QI, X., 2012: Range camera self-calibration with independent object space scale observations. – *Journal of Spatial Science* **57** (2): 247–257.
- LINDNER, M. & KOLB, A., 2009: Compensation of Motion Artifacts for Time-of-Flight Cameras. – *Dynamic 3D Imaging, LNCS*: 16–27, Springer.
- LUAN, X., 2001: Experimental Investigation of Photonic Mixer Device and Development of TOF 3D Ranging Systems Based on PMD Technology. – Dissertation, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Universität Siegen.
- LUHMANN, T., ROBSON, S., KYLE, S. & HARLEY, I., 2006: *Close Range Photogrammetry: Principles, Methods and Applications*. – Whittles Publishing, revised edition.
- MÖNNICH, H., NICOLAI, P., BEYL, T., RACZKOWSKY, J. & WÖRN, H., 2011: A supervision system for the intuitive usage of a telemanipulated surgical robotic. – *IEEE International Conference on Ro-*

- botics and Biomimetics (ROBIO 2011): 449–454.
- MURE-DUBOIS, J. & HÜGLI, H., 2007: Real-time scattering compensation for time-of-flight camera. – 5th International Conference on Computer Vision Systems.
- REICH, M., 2011: Untersuchung des Einsatzpotentials einer Laufzeitkamera zur quantitativen Erfassung von Verkehrsströmen. – Studienarbeit, Technische Universität Dresden, Institut für Festkörperelektronik.
- REULKE, R., 2006: Combination of distance data with high resolution images. – ISPRS Commission V Symposium.
- RINGBECK, T. & HAGEBEUKER, B., 2007: Dreidimensionale Objekterfassung in Echtzeit – PMD Kameras erfassen pro Pixel Distanz und Helligkeit mit Videoframerate. – Allgemeine Vermessungs-Nachrichten **114** (7): 263–270.
- RINGBECK, T., MÖLLER, T. & HAGEBEUKER, B., 2007: Multidimensional measurement by using 3-D PMD sensors. – Advances in Radio Science **5**: 135–146.
- ROBBINS, S., MURAWSKI, B. & SCHRÖDER, B., 2009: Photogrammetric calibration and colorization of the swissranger SR-3100 3-D range imaging sensor. – Optical Engineering **48**: 053603–053603–8.
- SCHULZE, M., 2010: 3D-camera based navigation of a mobile robot in an agricultural environment. – MILLS, J.P., BARBER, D.M., MILLER, P. & NEWTON, I. (eds.): The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **XXXVIII**: 538–542.
- SCHWARTE, R., 1996: Eine neuartige 3D-Kamera auf der Basis eines 2D-Gegentaktkorrelator-Arrays. – Aktuelle Entwicklungen und industrieller Einsatz der Bildverarbeitung: 111–117, Aachen, MIT GmbH.
- SCHWARTE, R., HEINOL, H., BUXBAUM, B., RINGBECK, T., XU, Z. & HARTMANN, K., 1999: Principles of three-dimensional imaging techniques. – JÄHNE, B., HAUSSECKER, H. & GEISSLER, P. (eds.): Handbook of Computer Vision and Applications – Sensors and Imaging **1** (18): 463–484, Academic Press.
- SNOW, K.B., 2002: Applications of Parameter Estimation and Hypothesis Testing of GPS Network Adjustments. – Technical Report 465, Geodetic and GeoInformation Science, Department of Civil Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University, Columbus, Ohio, USA.
- SPIRIG, T., SEITZ, P., VIETZE, O. & HEITGER, F., 1995: The lock-in CCD-two-dimensional synchronous detection of light. – IEEE Journal of Quantum Electronics **31** (9): 1705–1708.
- WESTFELD, P., 2007: Ansätze zur Kalibrierung des Range-Imaging-Sensors SR-3000 unter simultaner Verwendung von Intensitäts- und Entfernungsbildern. – LUHMANN, T. (ed.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Mess-technik (Beiträge Oldenburger 3D-Tage 2007): 137–146, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- WESTFELD, P. & HEMPEL, R., 2008: Range image sequence analysis by 2.5-D least squares tracking with variance component estimation and robust variance covariance matrix estimation. – CHEN J., JIANG, J. & MAAS, H.-G. (eds.): International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **XXXVII**: 457–462, ISPRS.
- WESTFELD, P., MULSOW, C. & SCHULZE, M., 2009: Photogrammetric calibration of range imaging sensors using intensity and range information simultaneously. – Optical 3D Measurement Techniques **IX** (II): pp. 129.
- WESTFELD, P., 2012: Geometrische und stochastische Modelle zur Verarbeitung von 3D-Kameradaten am Beispiel menschlicher Bewegungsanalysen. – Dissertation, Technische Universität Dresden, Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften, Professur für Photogrammetrie.
- WESTFELD, P., MAAS, H.-G., BRINGMANN, O., GRÖLLICH, D. & SCHMAUDER, M., 2013: Automatic techniques for 3D reconstruction of critical workplace body postures from range imaging data. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.08.004>.

Address of the Authors:

Dr.-Ing. PATRICK WESTFELD, Prof. Dr. sc. techn. habil. HANS-GERD MAAS, Technische Universität Dresden, Institute Photogrammetry and Remote Sensing, D-01062 Dresden, Tel.: +49-351-463-39701, Fax: +49-351-463-37266, e-mail: {patrick.westfeld}{hans-gerd.maas}@tu-dresden.de

Manuskript eingereicht: März 2013
Angenommen: August 2013



Advanced High Resolution SAR Interferometry of Urban Areas with Airborne Millimetrewave Radar

MICHAEL SCHMITT, München, CHRISTOPHE MAGNARD, Zürich, Schweiz, STEPHAN STANKO, Wachtberg, CHRISTIAN ACKERMANN & UWE STILLA, München

Keywords: synthetic aperture radar (SAR), SAR Interferometry, multi-aspect, airborne, urban areas, millimetrewaves

Summary: For rural and natural scenes, synthetic aperture radar interferometry (InSAR) has long been an operational technique for the generation of digital surface models. With the advent of sensors providing data in the decimetre resolution domain, also the analysis of densely built-up urban areas has become an increasingly important research topic. Due to the complexity of this kind of scenes, however, advanced interferometric techniques have to be employed. While usually satellite-borne stacks of multi-temporal data are collected in order to make use of differential SAR interferometry or the increasingly popular persistent scatterer technique, this article aims at the utilization of an airborne single-pass multi-baseline system working in the millimetrewave domain. Starting from the description of the exemplary German MEMPHIS sensor, the complete processing chain from the collection of necessary navigation data over the focusing of the raw SAR data to finally the application of sophisticated InSAR techniques is shown.

Zusammenfassung: Fortgeschrittene hochauflösende SAR Interferometrie urbaner Szenen mit flugzeuggetragenen Millimeterwellen Radar. Für ländliche und natürliche Szenen ist die SAR-Interferometrie seit langem eine operationelle Technik zur Generierung digitaler Oberflächenmodelle. Mit dem Einzug von Sensoren, die Daten im Dezimeter-Bereich bereitstellen, ist auch die Analyse dicht bebauter städtischer Gebiete ein zunehmend wichtiges Forschungsthema geworden. Wegen der Komplexität dieser Art von Szenen müssen jedoch fortgeschrittene interferometrische Techniken verwendet werden. Während dazu üblicherweise von Satelliten aus aufgenommene Stapel multi-temporalen Daten gesammelt werden, um sich der differentiellen SAR-Interferometrie oder der zunehmend populären Persistent Scatterer-Technik zu bedienen, zielt dieser Artikel auf die Verwendung eines flugzeuggetragenen Einpass-Mehrfachbasislinien-Systems ab, das im Millimeterwellenbereich arbeitet. Ausgehend von der beispielhaften Beschreibung des deutschen MEMPHIS-Sensors wird die komplette Prozessierungskette von der Aufnahme der benötigten Navigationsdaten über die Fokussierung der rohen SAR-Daten hin zur Anwendung hochentwickelter InSAR-Techniken gezeigt.

1 Introduction

The derivation of the topography of extended areas by across-track synthetic aperture radar (SAR) interferometry has been operational for quite some years now (BAMLER & HARTL 1998, ROSEN et al. 2000). New spaceborne missions with resolutions in the metre-range like the German TanDEM-X or the Italian COSMO-

Skymed satellites have led to a growing number of applications also for urban areas that have not been in the scope of lower resolution data before (STILLA 2007, SÖRGEL 2010). While spaceborne SAR systems are typically operated in L-, C- or X-band, it is reasonable to employ shorter wavelengths in the millimetre-wave domain (Ka-band or W-band) in order to maximize the achievable height estimation ac-

curacy even for limited baselines enabling the design of single-pass multi-baseline systems mounted on airborne platforms.

Together with the general ability of airborne sensors to realize almost arbitrary flight track configurations (in contrast to the fixed ascending/descending orbital geometry of most satellite sensors), this allows the utilization of advanced SAR interferometry methods like multi-baseline phase unwrapping, SAR tomography or multi-aspect data fusion, which greatly supports the reconstruction of digital surface models (DSMs) of complicated urban areas without the need to collect multi-temporal data stacks over relatively long periods of time. This is particularly interesting for time-critical disaster mapping scenarios.

Apart from these methodical capabilities, millimetrewave SAR provides additional convenient characteristics in comparison to X-band SAR, e.g. inherently low speckle and a larger amount of non-specular backscattering due to the higher sensitivity for surface roughness. Besides these, with millimetrewave SAR it is possible to generate high-resolution images with short synthetic aperture, while the systems can be miniaturized and therefore be adapted to unmanned aerial vehicles (UAVs), see for example (EDRICH & WEISS 2008, NOUVEL & PLESSIS 2008, STANKO et al. 2012).

This article presents the experimental German MEMPHIS system as an example for airborne millimetrewave SARs, although it has to be mentioned that first plans for spaceborne missions exist (SCHAEFER et al. 2012). Exploiting the high flexibility of airborne systems, the main focus of this paper is put on a high resolution interferometric analysis of urban scenes with the final goal of DSM reconstruction in mind. Starting from a description of the system's hardware, the sensor characteristics and the setup in the aircraft, the complete processing chain from the focusing of the raw data with the aid of a high-precision inertial navigation system (INS) to the exploitation of multi-baseline and multi-aspect data is shown. In this context preliminary results are presented based on real test data acquired during a flight campaign over the city of Munich, Germany, in 2011.

2 Interferometric SAR Analysis of Urban Areas – State of the Art

Since SAR interferometry was introduced in the the 1970s (GRAHAM 1974), it has continuously attracted the attention of an interdisciplinary research community. From plain single- or repeat-pass interferometry of natural and rural scenes via differential interferometric analysis of geophysical phenomena like earthquakes or volcanoes (GENS & VAN GENDEREN 1996) to the sophisticated persistent scatterer technique (FERRETTI et al. 2001) it has evolved to an operational remote sensing technology that has become indispensable to the earth observation and geoinformation communities. Among the most important developments is the ongoing improvement of imaging resolutions. While state-of-the-art spaceborne missions are now able to deliver data in the metre or even sub-metre domain, modern airborne sensors provide imagery with resolutions of down to several centimetres (BRENNER 2010). With the advent of this kind of very high and ultra high resolution sensors a detailed interferometric analysis of urban areas has become possible. However, due to the SAR inherent side-looking geometry, the exploitation of (interferometric) SAR data for the reconstruction of urban digital surface models needs sophisticated processing strategies and is still a commonly investigated topic in the research community (STILLA et al. 2003, BAMLER et al. 2009, SCHMITT et al. 2011, ROSSI et al. 2012). While much of the early work was based on model-driven image analysis in order to cope with or even exploit imaging effects like layover or shadowing (BOLTER 2001, THIELE et al. 2007), the derivation of point clouds by persistent scatterer interferometry (PSI) has drawn growing interest during the last decade (GERNHARDT et al. 2010). The main advantage of this framework is that only quasi-deterministic scatterers, whose reflectivities remain stable during a set of multi-temporal acquisitions, are considered for the analysis, thus leading to an enhanced point quality. Furthermore, in this way also information about the movement of these persistent scatterers can be derived – and remote sensing of four dimensions becomes possible. Since many repeat-pass images are needed for PSI, usually spaceborne

data is utilized for this technique. By fusing PSI point clouds from image stacks acquired by both ascending and descending satellite tracks as proposed by GERNHARDT et al. (2012), densely sampled 3D and even 4D point data of whole cities can be derived.

Another promising development in the field of SAR interferometry over urban areas is the utilization of array signal processing techniques for multi-baseline data, which can either be employed in order to realize real 3D imaging by the formation of so-called SAR tomograms or to separate multiple discrete scattering contributions whose signals were mixed in one resolution cell due to the layover effect. Recently, many propitious approaches have been proposed in this field, e.g. based on airborne PolInSAR data for detailed urban scatterer characterisation (SAUER et al. 2011). The latest improvement was the introduction of compressive sensing based algorithms, which provide an efficient means for the separation of discrete scattering contributions in layover resolution cells and were even adapted to the four-dimensional imaging of extended city areas (ZHU & BAMLER 2010, REALE et al. 2011).

Although obviously much progress has been made and a detailed imaging of urban areas by means of synthetic aperture radar has become a valuable remote sensing tool, some drawbacks remain: First of all, the core advantage of SAR remote sensing is the independence on daylight and weather conditions, making it especially interesting for time-critical tasks such as disaster mapping. However, this unique capability is lost if repeat-pass data have to be collected over relatively long periods of time. Furthermore, repeat-pass data suffer from temporal decorrelation, which eventually leads to a loss in coherence of the InSAR data and thus makes the related phase measurements less reliable. The second drawback is the SAR inherent side-looking imaging geometry that not only leads to the already-mentioned layover effect but also to radar shadowing causing areas without exploitable information in the images. An intuitive solution for this problem is the utilization of data from different aspect angles. However, state-of-the-art satellite missions only allow for the fusion of ascending and descending data stacks, i.e. two aspects, which only partly

helps to achieve comprehensive information. Therefore, this paper wants to emphasize the strengths of airborne single-pass multi-baseline InSAR systems: Using such systems, highly coherent data from almost arbitrary aspect angles can be acquired in very short time, thus providing the full advantages and flexibilities of radar remote sensing.

3 Millimetrewave SAR System Characteristics

The potential of advanced InSAR processing strategies exploiting millimetrewave system peculiarities is investigated based on experimental data acquired on a flight campaign in May 2011. During this campaign, an interferometric four-antenna configuration with a maximum baseline span of 27.5 cm was employed. The utilized airborne sensor, MEMPHIS, is described in section 3.1, and details about the interferometric configuration can be found in section 5.1. As illustrated in Fig. 1, the test scene, located in the Maxvorstadt neighbourhood of the city of Munich, Germany, was illuminated from a full multi-aspect configuration consisting of five orthogonal and anti-par-

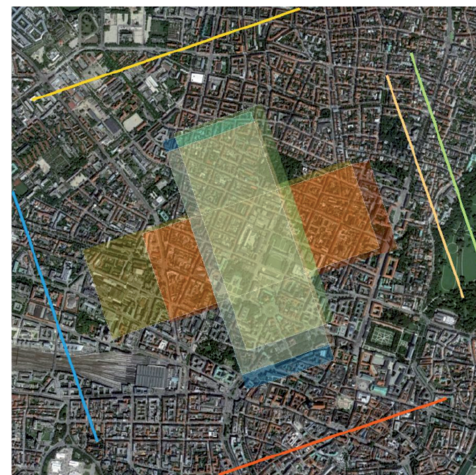


Fig. 1: Trajectories of the flight campaign Munich 2011. Note that the two tracks on the right to the scene were carried out at two different flying heights. Thus, a full multi-aspect configuration with an additional fifth acquisition was realized (Optical image ©2012 Google).

allel flight tracks. The goal of this campaign was to create an exemplary dataset of airborne multi-aspect multi-baseline InSAR data using a millimetrewave sensor in order to promote the development of advanced processing strategies necessary for urban area analysis.

3.1 The MEMPHIS Sensor

MEMPHIS (Millimeterwave Experimental Multifrequency Polarimetric High-resolution Interferometric System) was developed by the Fraunhofer Institute for High Frequency Physics and Radar Technology FHR in 1998 (SCHIMPF et al. 2002). The radar system uses two front-ends of identical architecture, and operates at 35 GHz and 94 GHz (Ka-band and W-band), respectively. The primary frequencies of 25 GHz and 85 GHz are generated by successive multiplication and filtering of the reference frequency of 100 MHz. For both subsystems the waveform is modulated onto an auxiliary signal at 9.4 GHz, which is up-converted into the respective frequency band together with the primary signal. Depending on the application, the sensor can either be used with polarimetric monopulse feeds or an interferometric set of four receiving antennae. The elevation-azimuth asymmetry of the beam that is necessary for SAR applications

is achieved by aspheric lenses in front of the feed horns. Being an experimental, modular and removable system, MEMPHIS is typically mounted on a C-160 Transall airplane of the German Armed Forces (see Fig. 2). Due to various possible antenna shapes and configurations, data can be acquired in many different SAR modes: single-pass multi-baseline cross-track interferometry with four receiving antennae, dual-pol circular or linear polarimetry and even monopulse for moving target indication (MTI).

3.2 Millimetrewave Peculiarities

Due to the fact that typical wavelengths of millimetrewave frequencies differ from more common radar remote sensing bands (L, C, X) in about one order of magnitude, several peculiarities have to be considered; some of them can be exploited advantageously. The main advantages of millimetrewave systems certainly are two-fold: First of all, they allow for a significant miniaturization of the hardware, thus enabling the use on unmanned aerial vehicles (UAVs) and other small-scale carrier platforms. Second, very high resolutions may be achieved with comparably short synthetic apertures. One of the advantages resulting from a short synthetic aperture is that images of vegetation will be better focused, because blurring caused by movements of leaves and branches etc. is reduced.

Additional peculiarities of millimetrewaves in comparison to conventional microwave regions occur in the fields of atmospheric propagation and surface roughness and are explained in the following. A more detailed summary of millimetrewave specifics can be found in ESSEN (2010).

3.2.1 Propagation through the atmosphere

For millimetrewave radar applications, mainly the transmission windows around 35 GHz and 94 GHz are employed, whereas high propagation losses prohibit long range applications (> 10 km). The millimetrewave region is nevertheless an interesting alternative to the more common X-band due to considerably different



Fig. 2: MEMPHIS radar mounted into a C-160. Top: Synergy infrared optical sensor, center: 35 GHz interferometric SAR antenna with $3^\circ \times 13^\circ$ beamwidth (box), bottom: 94 GHz polarimetric monopulse antenna with $1^\circ \times 13^\circ$ beamwidth.

propagation properties (SKOLNIK 1980), which are caused by resonance absorption at these frequencies related to energy levels of vibration and rotation states of molecules in the atmosphere, e. g. water vapour or oxygen.

In remote sensing, the propagation through snow, fog, haze or clouds is one of the most important reasons why SAR sensors are used. While in optical remote sensing the drop size within fog and clouds is in an order of magnitude where interactions with the electromagnetic radiation of the visible spectrum is most likely, these effects are of much minor importance for millimetrewaves. As long as the density of droplets is not too high, and as long as the liquid water content of snow is not excessively high, millimetrewave signals are able to penetrate most weather phenomena. Only hydrometeors with high density of large drop sizes in the order of the electromagnetic wavelength can severely influence the propagation of the signal and thus prevent the desired imaging of the Earth surface (DANKLMAYER & CHANDRA 2009). This is caused by the fact that the drops act as antennae in this case, absorbing the energy of the resonant electromagnetic wave.

For the case of smoke first experiments show a low attenuation for millimetrewaves, due to the small particle size of smoke in comparison to e. g. sand or dust. In these latter cases, experimental results can be used for an estimation of the expected propagation loss. These attributes make millimetrewaves almost just as interesting for any kind of mapping or reconnaissance mission during disaster scenarios, be it floodings (mostly in concurrence with clouds and rainfall), dust storms or fires.

It has to be mentioned however, that even within the millimetrewave domain differences between the different frequencies appear. For example, in W-band the attenuation signif-

icantly increases with high temperatures and humidity; it therefore is often used in weather radars (LIEBE 1985). For that reason, the choice of the band eventually depends on the mission goal.

3.2.2 Surface roughness properties

In the millimetrewave region, the wavelength is naturally very short in comparison to classical radar bands, i. e. the relating phase reacts very sensitively on movements of objects or the radar itself. While this might seem disadvantageous for a signal processing based imaging system that relies on the evaluation of the phase of the backscattered signal, it can be utilized beneficially instead. The reason is the specific scattering mechanism, which is dominated by a comparably much rougher surface (factor of 10 in comparison to X-band), making millimetrewave SAR more robust against uncontrolled movements of the carrier aircraft. In general, the roughness of surfaces causes diffuse scattering, whereas smooth surfaces result in specular reflections. At millimetrewave frequencies, most surfaces appear rough, and diffuse scattering dominates the images (see Tab. 1). Diffuse scattering leads to coherent averaging, an effect similar to multilook processing. Therefore, the inherent speckle effect within scenes of homogeneous surface structure is lower at millimetrewave frequencies than at X-band for an equal amount of multilook processing. Besides this primary advantage of higher roughness sensitivity, another one is the larger extent of rough appearing surfaces in often rather smooth urban environments. This provides a convenient benefit to the analysis of backscattering characteristics, which is often based on the assumption of Gaussian scattering. Since this assumption only holds for so-called distribut-

Tab. 1: Definition of radar roughness categories. The RMS surface height variations (cm) at a local incidence angle of 45° are shown (after LILLESAND et al. 2004)

	Ka-band ($\lambda = 0.86$ cm)	X-band ($\lambda = 3.2$ cm)	L-band ($\lambda = 23.5$ cm)
Smooth	< 0.05	< 0.18	< 1.33
Intermediate	0.05 – 0.28	0.18 – 1.03	1.33 – 7.55
Rough	> 0.28	> 1.03	> 7.55

ed scatterers and not for frequently occurring point scatterers, millimetrewaves are favourable over longer wavelengths, where tendentially surfaces appear less rough and therefore more point scattering behaviours or specular reflections are observed.

3.3 Navigation Systems

Since the precision of the aircraft navigation data is not sufficient for high-precision SAR processing, for the 2011 campaign the system was complemented with a dGPS system composed of a GPS L1/L2 antenna (AeroAntenna AT2775-41) coupled to a receiver running at 20 Hz sampling rate (Trimble R7) and a precise INS working at 500 Hz sampling rate (iNAV-RQH from the company IMAR). The GPS, INS and SAR systems were synchronised through event markers and secondary markers with the GPS time. The realization of time synchronisation for the IMU was carried out by the pulse per second (PPS) signal and NMEA information of the GPS receiver. The navigation solution of the GPS and IMU data was then processed with the commercial software Inertial Explorer using dGPS data from reference base stations (WAYPOINT PRODUCTS GROUP 2013). The navigation data were finally smoothed with a Kalman filter to avoid small variations in the millimetre range, which would introduce artefacts in the focused SAR data. The lever arms between the dGPS antenna, the INS and the SAR antennas fixed in operating position were measured using terrestrial surveying methods with a few centimetres accuracy.

4 SAR Raw Data Processing

MEMPHIS is a stepped-frequency radar system, where the pulse length can be adjusted in the range of 80 ns – 2 μ s. For the high-resolution mode, it successively transmits 8 chirps of 200 MHz bandwidth with a 100 MHz carrier frequency shift between each other, thus building together a 900 MHz full bandwidth, resulting in a range resolution of about 16.5 cm. As described in MAGNARD et al. (2012), the raw data from each chirp are first

focused in range using a chirp replica with the conventional matched filtering technique. The full bandwidth is reconstructed in the frequency domain through an algorithm based on LORD (2000) and WILKINSON et al. (1998). The azimuth compression is performed with the Extended Omega-K algorithm (REIGBER et al. 2006), resulting in a zero-Doppler slant range geometry. The block diagram in Fig. 3 shows the processing chain of the algorithm.

One of the most critical steps for reaching high focusing quality and geolocation accuracy is the motion compensation, which can be divided in a first and a second order step; the geometry is shown in Fig. 4.

The first order motion compensation is achieved as follows:

- The navigation data are upsampled to the pulse repetition frequency (PRF) rate.
- A linearized track is defined using a least squares method on the position data in

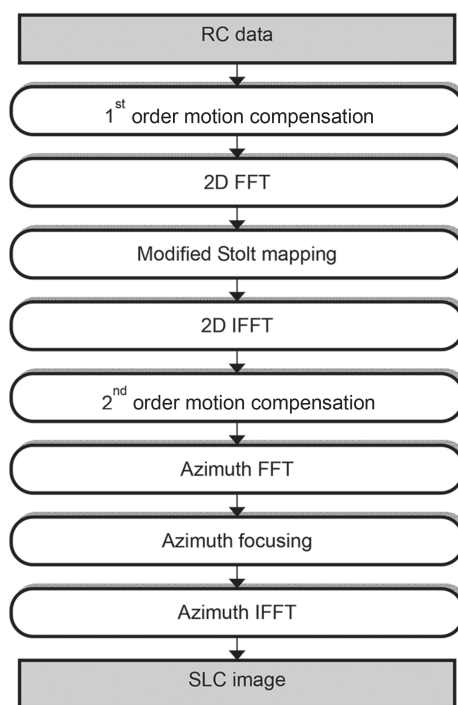


Fig. 3: Block diagram of the Extended Omega-K algorithm (FFT = fast Fourier transform, IFFT = inverse fast Fourier transform, SLC = single look complex).

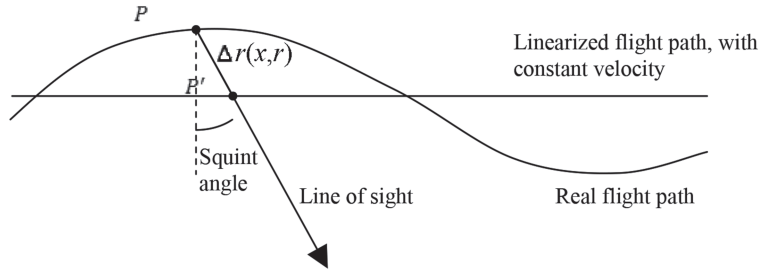


Fig. 4: Geometry of the motion compensation. The plane represented in the sketch is a plane formed by the linearized flight path and the line of sight.

global Cartesian coordinates. A constant linearised velocity is defined.

- For each echo, the projection of the vector $\overrightarrow{PP'}$ linking the real and the linearized track onto the mid-range line of sight is evaluated. The result corresponds to the first order range correction $\Delta r(x, r_m)$ in REIGBER et al. (2006), with x the azimuth position and r_m the mid-range distance. The phase and position in the range direction of the range-compressed (RC) data are corrected according to this value.
- The RC data are interpolated in azimuth direction according to the constant linearized velocity, getting a regular (constant) spatial azimuth sampling.

The second order motion compensation consists of the following procedure:

- The vector linking the real and linearized track is projected onto the line of sight of each range sample (using a flat reference surface), yielding the second order range correction $\Delta r(x, r)$ used in REIGBER et al. (2006), with r being the range distance. The difference between this projection and the one applied in the first order motion compensation is used for correcting the phase and position of the data.

The motion compensation works best for objects at the reference surface. The more the objects are above or below this surface or the larger the difference between the real and the linearized flight path is, the larger the geolocation errors and the focusing degradation will be.

5 Advanced SAR Interferometry Applications

In this section, the application of MEMPHIS data as an example for a single-pass multi-baseline millimetrewave InSAR system is shown with respect to advanced InSAR analysis and a focus on the reconstruction of digital surface models of urban areas. Since modern sensors are able to provide SAR imagery in the decimetre-resolution class, the interferometric analysis of densely built-up inner city areas has challenged the remote sensing community. This is especially caused by the SAR inherent side-looking imaging geometry that produces effects like layover and shadowing, making the interpretation of (In)SAR imagery of urban scenes a non-trivial task. While shadowing leads to image patches without exploitable information, layover on the one hand leads to difficulties in the phase-unwrapping stage of classic SAR interferometry, and on the other hand causes signal mixtures of different backscatterers, e.g. roof and wall of a building together with the ground in front of the building. A sketch illustrating these effects can be found in Fig. 5.

5.1 Multi-baseline InSAR

5.1.1 Phase unwrapping

The multi-baseline configuration of MEMPHIS can conveniently be exploited for the phase unwrapping stage during a standard InSAR processing chain. In order to do so, the fact that the four receiving antennae can be

with the longest baseline is unwrapped. An example of the unwrapping is shown in Fig. 6.

Tab. 2: Typical ambiguity heights for the Ka-band antenna of MEMPHIS at mid-range (1631 m), sensor altitude: 715 m above ground level, baseline inclination: 65°.

Receiving antennas	Baseline (cm)	Height ambiguity (m)
R_1, R_2	$B_1 = 5.5$	227.7
R_2, R_3 or R_3, R_4	$B_2 = 11.0$	113.9
R_1, R_3	$B_3 = 16.5$	75.9
R_2, R_4	$B_4 = 22.0$	56.9
R_1, R_4	$B_5 = 27.5$	45.6

5.1.2 Layover separation and tomography

Layover separation can either be seen as a multi-baseline extension of classic single-baseline interferometry or as a special case of SAR tomography (TomoSAR). TomoSAR is based on the establishment of a synthetic aperture in elevation direction by exploitation of stacked coregistered images acquired from slightly different viewing angles. In contrast to the synthetic aperture that is employed for azimuth focusing, the tomographic (elevation) aperture can only make use of a sparse and irregularly sampled aperture – which is especially tough for the single-pass MEMPHIS case with just four samples (coming from the four receiving antennas) per resolution cell. It is well known, e.g. REIGBER & MOREIRA

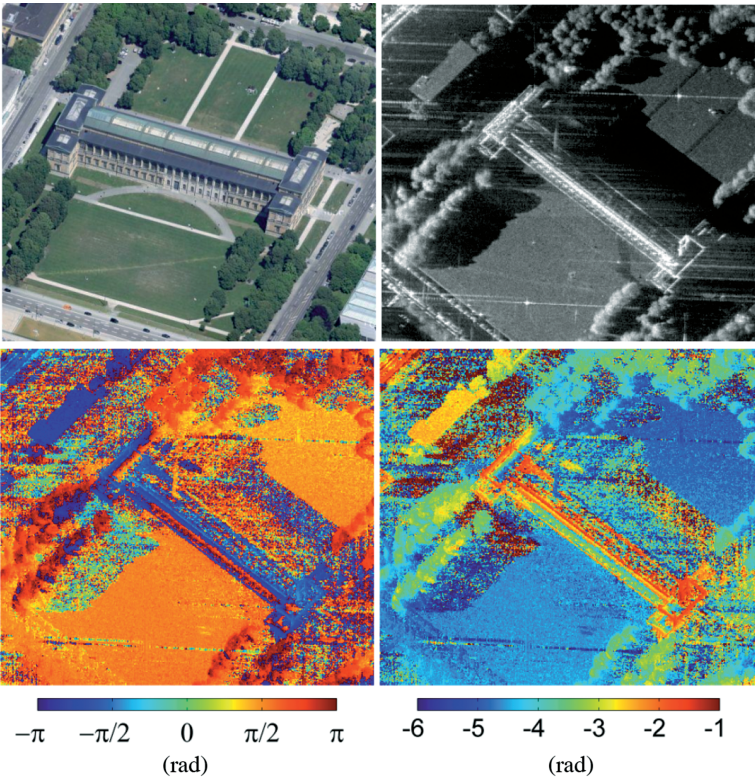


Fig. 6: The top-left image is an oblique-view aerial image and shows the “Alte Pinakothek” in Munich, Germany. The top-right image shows a SAR amplitude image of the same building acquired in 2011. The bottom-left image shows the corresponding interferogram with the largest baseline (27.5 cm), and the bottom-right image shows the same interferogram after the phase unwrapping process (Optical image ©2012 Google).

(2000), that the expected height resolution of single-pass multi-baseline InSAR systems is given by

$$\rho_h = \frac{\lambda R \sin(\theta)}{\Delta B} \quad (4)$$

Since ΔB equals to the overall baseline length, and $\theta \approx \alpha$ for MEMPHIS, the height resolution equals to the height ambiguity as calculated using (3) and shown in Tab.2 for the longest baseline B_5 , namely ca. 45 m. Since this resolution is far worse than the achievable azimuth and range resolutions, the reflectivity profiles of the resolution cells are usually estimated using spectral analysis methods with super-resolution capabilities, e.g. MUSIC (multiple signal classification) (SCHMIDT 1986). A first example based on application of MUSIC-based spectral estimation to an urban

scene can be seen in Fig. 7. The processing is organized as follows:

- First, the complex covariance matrix is estimated for every pixel of the stack using an adaptive filter proposed in SCHMITT & STILLER (2013b).
- Next, the covariance matrix is eigen-decomposed in order to separate the eigenvectors belonging to noise space E_N from the eigenvectors belonging to signal space E_S .
- Using the steering vector

$$\vec{a}(h) = \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_{\perp,n}}{R \sin(\theta)} h\right) \quad (5)$$

where λ denotes the wavelength, $B_{\perp,n}$ is the perpendicular baseline between the master antenna and antenna n , R is the slant range distance, θ is the off-nadir angle, and h is

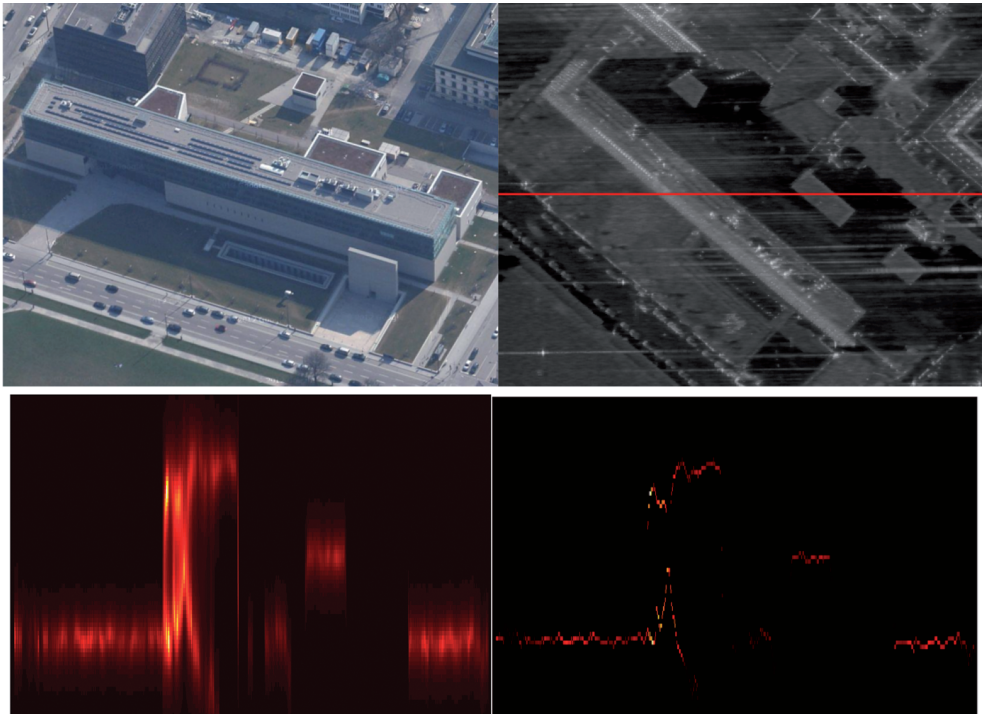


Fig. 7: Single-pass TomoSAR results for a test building in the city of Munich, Germany. The top-left image shows an oblique view aerial image of the building, the top-right image displays the SAR intensity image and the azimuth profile under investigation (red line). The bottom images show tomographic slices: The continuous MUSIC pseudo-spectrum is displayed on the left, the discrete scattering profile is displayed on the right. Note the double scatterers that have been detected in the layover part (Optical image ©2012 Google).

the height above the reference surface, the MUSIC pseudo-spectrum

$$P_{MUSIC}(h) = \frac{1}{\vec{a}^H(h) E_N^H E_N \vec{a}(h)} \quad (6)$$

is estimated for every resolution cell. The superscript H denotes the conjugate transpose.

For the visualization in Fig. 7, the continuous MUSIC pseudo-reflectivities are displayed for one azimuth slice. Although these results are just preliminary, they show a promising perspective for future investigations in more advanced SAR tomography methods.

Basically, both TomoSAR and layover separation rely on the same principles. The main difference is that TomoSAR intends to reconstruct the full, possibly continuous reflectivity profile for each resolution cell in order to realize real 3D imaging for example for scenes with volume scattering, whereas layover separation is the utilization of multi-baseline SAR interferometry for the separation of discrete scatterers whose backscattering has mixed due to the layover effect. It is well-known that single-pass systems are theoretically able to retrieve the heights of $K = N - 1$ scatterers (N : number of receiving antennae), which means that MEMPHIS should be able to separate the information of up to three height contributions within one resolution cell. Using simulated test data, SCHMITT & STILLA (2013a) have

shown that methods like distributed compressive sensing should be able to successfully reconstruct discrete backscattering profiles containing two point scatterers from a height separation of about 12 m – 13 m for sufficiently high signal-to-noise ratio (SNR).

If discrete scatterers are to be detected using the MUSIC procedure described above, their height can be determined by

$$\hat{h} = \max_h P_{MUSIC} \quad (7)$$

The resulting profile of discrete scattering points is also shown in Fig. 7. Obviously, some double scatterers caused by layover have been detected and resolved successfully, although the resolution capability seems to become worse with shrinking height difference between the scatterers.

5.2 Multi-Aspect Data Fusion

As has been mentioned before, the shadowing effect leads to gaps in the reconstructed height data if only one single dataset is used. A promising approach to cope with this problem is the utilization of images recorded from different aspect angles (see Fig. 1). In this way, on the one hand potential gaps can be filled with complementary data, while on the other hand redundant measurements can be exploited to enhance the final reconstruction accuracy. The advantage of single-pass interferometric data is that shadowing can easily be detected by looking for pixels showing low coherence. In order to show the significance of multi-aspect InSAR configurations, the backward geocoding procedure as proposed in SCHMITT & STILLA (2011) is employed: First, the desired mapping grid is defined in the world coordinate system of choice, e.g. UTM. Then, each grid element is extended to the height dimension with a pre-defined height spacing in order to receive a set of height hypotheses. Each height hypothesis is then projected into one or more available aspects using the inverted, linearized range-Doppler equations:

$$t = \frac{(\mathbf{p} - \mathbf{s}_o) \mathbf{v}}{\|\mathbf{v}\|^2} \quad (8)$$



Fig. 8: Zoom into the area of interest used for the illustrations in Figs. 9 and 10 (Optical image ©2012 Google).

$$R = \|\mathbf{p} - \mathbf{s}\| \quad (9)$$

Where $\mathbf{p} = [x \ y \ z]^T$ denotes the 3D hypothesis, $\mathbf{s}_0 = [x_{s0} \ y_{s0} \ z_{s0}]^T$ describes the master antenna position during acquisition of the first azimuth bin, and $\mathbf{v} = [v_x \ v_y \ v_z]^T$ is the three-dimensional velocity vector of the master antenna. Then, the interferometric phase $\phi_{measured}$ is measured for the projected pixel and compared to the expected (simulated) interferometric phase

$$\phi_{simulated} = \left\langle -\frac{2\pi}{\lambda} (\|\mathbf{p} - \mathbf{s}_M\| - \|\mathbf{p} - \mathbf{s}_{Sl}\|) \right\rangle_{2\pi}, \quad (10)$$

where $\mathbf{s}_M$ and $\mathbf{s}_{Sl}$ denote the positions of the master and the slave sensor, respectively, and $\langle \rangle_{2\pi}$ denotes the wrapping operator. Finally, the height hypothesis that leads to the smallest difference between measured and simulated phase is kept as the actual height value of the grid element. If more than one dataset, i. e. aspect, is available, the height value can be chosen according to the mean difference between simulated and measured phase values weighted by the corresponding coherence values, such that redundant observations are exploited for each grid element. The weighting by coherence enables that only reliable phase measurements are considered, while shadow pixels (with typically low coherence) do not influence the result significantly.

Fig. 9 shows the scene converted into a binary map with all potential shadow pixels being

displayed in black. It can clearly be seen how the combination of multiple aspects enhances the overall coverage of the area. While 58.6% of the scene are occluded due to shadowing in the single aspect case, using a joint analysis of multiple aspects leads to a low amount of non-information pixels of just 14.4%. These remaining non-information pixels are partly caused by narrow street canyons and possibly also by specular reflections.

The raw 2.5D DSM resulting from the fusion of five aspects acquired from crossing and anti-parallel trajectories at two different heights (see Fig. 1) is shown in Fig. 10.

In addition to conventional multi-aspect configurations, PALM et al. (2012) have recently shown how circular trajectories can be used as the supreme form of multi-aspect SAR imaging: The circular trajectory is just cut into overlapping sub-tracks of 2.5°, i. e. in total more than 140 MASAR (multiple aspect SAR) images are generated. It is, however, still an open question how many views are needed in order to realize the ideal multi-aspect configuration.

6 Conclusion and Outlook

In this article, the utilization of an airborne single-pass multi-baseline SAR system for advanced interferometric SAR analysis of complex urban scenes has been described; furthermore, the benefit of radar technology in the

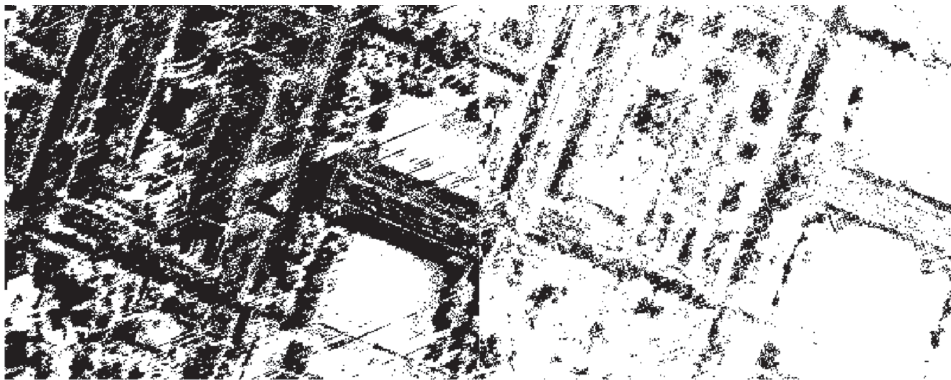


Fig. 9: Pixels for which no or only unreliable phase measurements are available are shown in black, high coherence pixels are shown in white. Left: one aspect alone. Right: five aspects merged. Note the improvement of the amount of available information by multi-aspect data fusion.

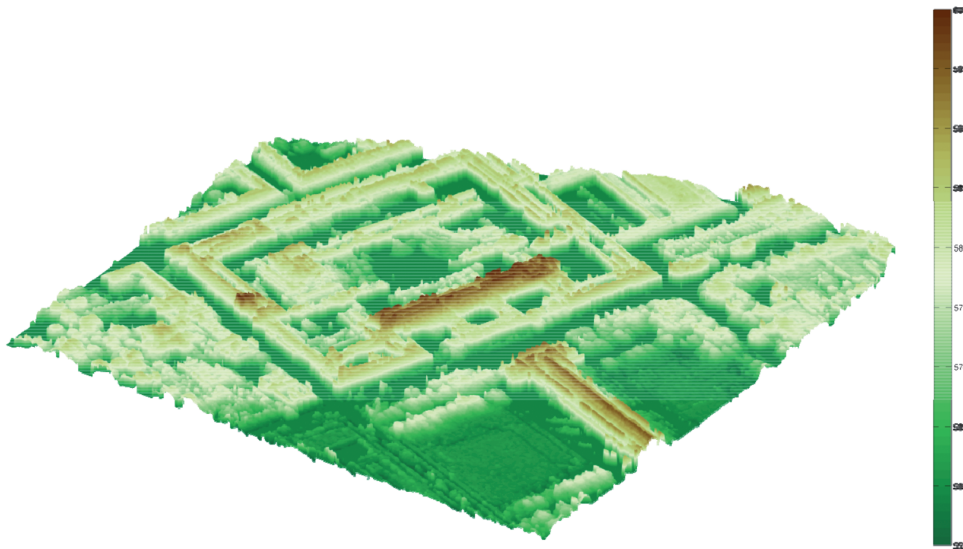


Fig. 10: Digital surface model as a result of multi-aspect InSAR data fusion by an enhanced version of the backward geocoding procedure.

millimetrewave domain has been discussed. Motivated by the goal to create digital surface models of densely built-up inner city areas, the full processing chain that is necessary has been shown: Starting from an exemplary sensor and navigation hardware description, via the focusing of the raw radar signals to single look complex SAR imagery up to sophisticated interferometric applications exploiting multi-baseline as well as multi-aspect configurations, a lot of interdisciplinary expertise is needed to generate competitive results. The potential of airborne single-pass multi-baseline data for time-critical mapping scenarios has been explained and state-of-the-art processing outputs have been shown. To sum up, it can be observed that both airborne and spaceborne SAR remote sensing have their distinct advantages, which can be exploited favourably subject to the specific task. Beyond that, cutting-edge airborne sensors may always be used as testing prototypes for future spaceborne missions.

Future work in the field of airborne SAR will mainly have to focus on effective utilization of only sparsely available data. Since it is expensive and cumbersome to either collect large data stacks or to equip carrier platforms with many receiving antennas, method-

ological developments should aim at achieving maximum information from minimum available measurements. This way the time and cost efficiency of synthetic aperture radar remote sensing will come to its full prestige, while ever improving sensor technology and increasingly sophisticated processing strategies will enable a precise and comprehensive mapping of urban areas.

References

- BAMLER, R. & HARTL, P., 1998: Synthetic aperture radar interferometry. – *Inverse Problems* **14** (4): R1–R54.
- BAMLER, R., EINEDER, M., ADAM, N., ZHU, X. & GERNHARDT, S., 2009: Interferometric potential of high resolution spaceborne SAR. – *PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation* **2009** (5): 407–419.
- BOLTER, R., 2001: Buildings from SAR: Detection and reconstruction of buildings from multiple view high resolution interferometric SAR data. – PhD Thesis, Technische Universität Graz, Österreich.
- BRENNER, A.R., 2010: Proof of concept for airborne SAR imaging with 5 cm resolution in X-band. – 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar: 615–618.

- DANKLMAYER, A. & CHANDRA, M., 2009: Precipitation effects for Ka-band SAR. – *Advanced RF Sensors for Earth Observation*.
- EDRICH, M. & WEISS, G., 2008: Second-generation Ka-band UAV SAR system. – 38th European Microwave Conference: 1636–1639.
- ESSEN, H., BREHM, T., BOEHMSDORFF, S. & STILLA, U., 2007: Multibaseline interferometric SAR at millimeterwaves – Test of an algorithm on real data and a synthetic scene. – *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **36** (3/W49B): 35–39.
- ESSEN, H., 2010: Airborne remote sensing at millimeter wave frequencies. – SÖRGEL, U. (ed.): *Radar remote sensing of urban areas*. – Springer Science + Business Media.
- FERRETTI, A., PRATI, C. & ROCCA, F., 2001: Permanent scatterers in SAR interferometry. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **39** (1): 8–20.
- GENS, R. & VAN GENDEREN, J.L., 1996: Review article SAR interferometry – issues, techniques, applications. – *International Journal of Remote Sensing* **17** (10): 1803–1835.
- GERNHARDT, S., ADAM, N., EINEDER, M. & BAMLER, R., 2010: Potential of very high resolution SAR for persistent scatterer interferometry in urban areas. – *Annals of GIS* **16** (2): 103–111.
- GERNHARDT, S., CONG, X., EINEDER, M., HINZ, S. & BAMLER, R., 2012: Geometrical fusion of multi-track PS point clouds. – *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* **9** (1): 38–42.
- GRAHAM, L.C., 1974: Synthetic interferometer radar for topographic mapping. – *IEEE* **62** (6): 763–768.
- LIEBE, H.J., 1985: An updated model for millimeter wave propagation in moist air. – *Radio Science* **20** (5): 1069–1089.
- LILLESAND, T.M., KIEFER, R.W. & CHIPMAN, J.W., 2004: *Remote sensing and image interpretation*. – 5th Edition, John Wiley & Sons.
- LORD, R., 2000: Aspects of stepped-frequency processing for low-frequency SAR systems. – PhD Thesis, University of Cape Town, South Africa.
- MAGNARD, C., BREHM, T., ESSEN, H. & MEIER, E., 2012: High resolution MEMPHIS SAR data processing and applications. – *PIERS*: 328–332.
- NOUVEL, J.F. & PLESSIS, O.R., 2008: The ONERA compact SAR in Ka-band. – 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar: 183–186, on CD.
- PALM, S., ORIOU, H.M. & CANTALLOUBE, H.M., 2012: Radargrammetric DEM extraction over urban area using circular SAR imagery. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **50** (11): 4720–4725.
- REALE, D., FORNARO, G., PAUCIULLO, A., ZHU, X. & BAMLER, R., 2011: Tomographic imaging and monitoring of buildings with very high resolution SAR data. – *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* **8** (4): 661–665.
- REIGBER, A. & MOREIRA, A., 2000: First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **38** (5): 2142–2152.
- REIGBER, A., ALIVIZATOS, E., POTSIS, A. & MOREIRA, A., 2006: Extended wavenumber-domain synthetic aperture radar focusing with integrated motion compensation. – *IEEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation* **153** (3): 301–310.
- ROSEN, P.A., HENSLEY, S., JOUGHIN, I.R., LI, F.K., MADSEN, S.N., RODRIGUEZ, E. & GOLDSTEIN, R.M., 2000: Synthetic aperture radar interferometry. – *Proceedings of the IEEE* **88** (3): 333–382.
- ROSSI, C., FRITZ, T., EINEDER, M., ERTEN, E., ZHU, X. & GERNHARDT, S., 2012: Towards an urban DEM generation with satellite SAR interferometry. – *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **39** (B7): 73–78.
- SAUER, S., FERRO-FAMIL, L. & REIGBER, A., 2011: Three-dimensional imaging and scattering mechanism estimation over urban scenes using dual-baseline polarimetric InSAR observations at L-band. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **49** (11): 4616–4629.
- SCHAEFER, C., VÖLKER, M., LOPEZ-DEKKER, P., YOUNIS, M., DAGAZO-EUSEBIO, E. & LUDWIG, M., 2012: Space-borne Ka-band across-track SAR interferometer. – 1st International Workshop on Ka-band Earth Observation Radar Missions.
- SCHIMPF, H., ESSEN, H., BOEHMSDORFF, H. & BREHM, T., 2002: MEMPHIS – a fully polarimetric experimental radar. – *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*: 1714–1716.
- SCHMIDT, R.O., 1986: Multiple emitter location and signal parameter estimation. – *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **34** (3): 276–280.
- SCHMITT, M., MAGNARD, C., BREHM, T. & STILLA, U., 2011: Towards airborne single pass decimeter resolution SAR interferometry over urban areas. – STILLA, U., ROTTENSTEINER, F., MAYER, H., JUTZI, B. & BUTENUTH, M. (eds.): *Photogrammetric Image Analysis. Lecture Notes in Computer Science* **6952**: 197–208.
- SCHMITT, M. & STILLA, U., 2011: Fusion of airborne multi-aspect InSAR data by simultaneous backward geocoding. – *Joint Urban Remote Sensing Event*: 53–56.

- SCHMITT, M. & STILLA, U., 2013a: Compressive-sensing based layover separation in airborne single-pass multi-baseline InSAR data. – IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters **10** (2): 313–317.
- SCHMITT, M. & STILLA, U., 2013b: Adaptive multi-looking of airborne single-pass multi-baseline InSAR stacks. – IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing: in press.
- SKOLNIK, M.I., 1980: Introduction to radar systems. – McGraw-Hill, New York, USA.
- SÖRGEL, U., 2010: Radar remote sensing of urban areas. – Springer Science + Business Media.
- STANKO, S., JOHANNES, W., SOMMER, R., WAHLEN, A., SCHRÖDER, M. & CARIS, M., 2012: SUMATRA – A UAV based miniaturized SAR system. – 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar: 30–33.
- STILLA, U., SÖRGEL, U. & THÖNNESSEN, U., 2003: Potential and limits of InSAR data for building reconstruction in built-up areas. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **58** (1–2): 113–123.
- STILLA, U., 2007: High resolution radar imaging of urban areas. – FRITSCH, D. (ed.): Photogrammetric Week '07: 149–158.
- THIELE, A., CADARIO, E., SCHULZ, K., THÖNNESSEN, U. & SÖRGEL, U., 2007: InSAR phase profiles at building locations. – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **36** (3/W49A): 203–208.
- WAYPOINT PRODUCTS GROUP, 2013: Inertial Explorer® User Guide. Online: http://www.novatel.com/assets/Documents/Waypoint/Downloads/InertialExplorer850_Manual.pdf (17.6.2013).
- WILKINSON, A.J., LORD, R.T. & INGGS, M.R., 1998: Stepped-frequency processing by reconstruction of target reflectivity spectrum. – 1998 South African Symposium on Communications and Signal Processing: 101–104.
- ZHU, X. & BAMLER, R., 2010: Tomographic SAR inversion by L1 norm regularization – The compressive sensing approach. – IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **48** (10): 3839–3846.

Addresses of the Authors:

Dipl.-Ing. MICHAEL SCHMITT, Univ.-Prof. Dr.-Ing. UWE STILLA, Technische Universität München, Photogrammetry and Remote Sensing, D-80333 München, Tel.: +49-89-289-22672, -22671, Fax: +49-89-289-23202, e-mail: {michael.schmitt}{stilla}@bv.tum.de

CHRISTOPHE MAGNARD, MSc, University of Zurich, Remote Sensing Laboratories, CH-8057 Zürich, Tel.: +41-44-6355197, Fax: +41-44-6356846, e-mail: christophe.magnard@geo.uzh.ch

Dr. STEPHAN STANKO, Fraunhofer Institute for High Frequency Physics and Radar Techniques FHR, D-53343 Wachtberg, Tel.: +49-228-9435-704, Fax: +49-228-9435-608, e-mail: stephan.stanko@fhr.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. (FH) CHRISTIAN ACKERMANN, Technische Universität München, Institute for Astronomical and Physical Geodesy, D-80333 München, Tel.: +49-89-289-23187, Fax: +49-89-289-23178, e-mail: ackermann@bv.tum.de

Manuskript eingereicht: Februar 2013
Angenommen: Juni 2013

Berichte von Veranstaltungen

Geospatial World Forum, 13. – 21. May 2013, Rotterdam, The Netherlands

The Geospatial World Forum is an event, where industrial leaders come together with government decision makers, and selected members of the academic community are also invited. The Geospatial World Forum are organized by Geospatial Media of Noila, U.P., India. The first two events were held in Hyderabad, A.P., at which the ITC, The Netherlands, and the Institute for Photogrammetry and Geoinformation of the Leibniz University Hannover received public recognition for their academic work. In 2011 the Geospatial World Forum was held for the first time in Europe. Co-sponsor was the Dutch Cadastre, and the meeting was held in the excellent convention center RAR in Amsterdam. In 2013 the meeting was held in Rotterdam from May 13 to 17.

DORINE BURMANJE, Chair of the Land Registration and Mapping Agency of The Netherlands, and SANJAY KUMAR, CEO of Geospatial Media opened the Forum in the evening of May 13. The first plenary session was held on May 14 in the morning. It was chaired by Ms.

BARBARA RYAN of GEO in Geneva. It was a summary of important developments in geospatial technology by industrial leaders: RAY O'CONNOR, President and CEO of Topcon, Japan noted, that 40% of the world's construction is carried out in China, which is the biggest industrial development followed by agriculture, producing nutrients for crops, as the second biggest industry. Currently, a strong tendency for construction automation can be seen. TED LAMBOV, Senior Vice President of Bentley, discussed the growth of geospatial technology. At Bentley with a 550 M\$ turnover in 2012 25% goes into reinvestment. The generation of point clouds of 100's of GB has led to large storage users and the introduction of modeling with overlays of augmented reality. In this context, Bentley Mobile Mapping has been developed as a new product. STEVEN WOOD of Digital Globe discussed the merger of Digital Globe and GeoEye under the light of the WorldView-3 satellite scheduled for 2014. At present five Digital Globe satellites are orbiting, from which four billion km² of imagery have been archived, amounting to 50PB of data. Within one year the entire globe was covered by high resolution imagery. AMAR



Reception at the town hall of Rotterdam. From left: MARTIEN MOLENAAR, ITC, The Netherlands; FRASER TAYLOR, Canada; MILAN KONEČNÝ, Czech Republic; SISI ZLATANOVA, TU Delft, The Netherlands.

HANSPAL of Autodesk spoke on the future of geo-enabled design technology due to growing infrastructure needs. China alone builds 15 cities not existing today with an investment need of 60 trillion \$. He pointed out that GIS needs to be expanded into BIM (Building information modeling) for infrastructure management. RAMON BARTOLOME PASTOR, Vice President of Hewlett-Packard noted, that HP is a 180 billion \$ IT provider for the oil and gas industry and for mining.

This session was followed by panel discussions, further plenary and numerous parallel sessions. In summary, the discussions concentrated on the highest obstacles to overcome: technology, the educational process and the human infrastructure. More information about program and presentations can be found at www.geospatialworldforum.org. The next edition of the Geospatial World Forum will be held 5. – 9.5.2014 in Geneva, Switzerland.

GOTTFRIED KONECNY, Hannover

International SIG 3D and OGC Workshop on Requirements for CityGML 3.0, 20. – 21. Juni 2013, Technische Universität München

Auf Einladung der Technischen Universität München, Lehrstuhl für Geoinformatik, der Arbeitsgruppe Modellierung der Special Interest Group 3D der Geodateninfrastruktur Deutschland (SIG 3D) und der CityGML Standards Working Group des Open Geospatial Consortium (OGC) trafen sich unter der Leitung von THOMAS H. KOLBE und TATJANA KUTZNER (TUM), GERHARD GRÖGER und KARL-HEINZ HÄFELE (SIG 3D) sowie STEVE CARL SMYTH, CARSTEN ROENSDORF und CLAUS NAGEL (OGC) vom 20. bis 21. Juni 2013 rund 50 Experten aus Europa, Asien und Nordamerika, um über Anforderungen an die Weiterentwicklung von CityGML zu diskutieren. CityGML ist ein internationaler Standard, der ein Datenmodell und ein XML-basiertes Transferformat für 3D-Stadt- und Landschaftsmodelle definiert. CityGML erfährt eine breite Akzeptanz in vielen Großstädten, vor allem in Europa und Asien, wird aber in Deutschland und den Niederlanden auch als nationaler Standard für den

Austausch von Gebäudedaten bzw. großmaßstäbigen topographischen Daten verwendet und diente auf europäischer Ebene als Grundlage für die Entwicklung des INSPIRE-Datenthemas „Gebäude“.

Bereits im Vorfeld des Workshops hatten die Veranstalter vier Themenschwerpunkte identifiziert, zu denen jeweils Experten und Anwender des Standards aus der Industrie, der Verwaltung sowie aus dem Hochschulbereich von ihren Erfahrungen mit CityGML berichteten und Anforderungen an die Weiterentwicklung des Standards formulierten. Die wichtigsten Anforderungen werden im Folgenden kurz beschrieben:

Themenschwerpunkt „verbesserte Unterstützung für Simulationsanwendungen“: Aus den Berichten der Experten wurde das breite Anwendungsspektrum für CityGML-gestützte Simulationen deutlich. Die vorgestellten Anwendungen reichten dabei von der Lärmsimulation im Rahmen der EU-Umgebungslärmrichtlinie, der Simulation von Kaskadeneffekten beim Ausfall von Versorgungsinfrastrukturen, der Energiebedarfsschätzung und strategischen Energieplanung über Solarpotenzialanalysen bis hin zur Analyse von Detonationseinwirkungen in urbanen Gebieten. CityGML-Objekte dienen bei diesen Anwendungen sowohl als Eingangsdaten für eine Simulation als auch als Träger der Simulationsergebnisse. Für die verbesserte Unterstützung von Simulationsanwendungen wurden folgende Anforderungen an eine Weiterentwicklung von CityGML diskutiert:

- Attribute mit komplexen Datentypen zur genaueren Beschreibung der Semantik von Attributwerten (z.B. Attributwert wurde gemessen, geschätzt oder ist Default-Wert) bzw. für die Speicherung von Qualitätsangaben auf der Ebene von Attributen (z.B. Standardabweichung),
- Berücksichtigung der Dimension Zeit, z.B. in Form von zeitvarianten Attributen, funktionalen Abhängigkeiten und zeit-diskreten Repräsentationen von Objekten,
- Modellierung von Materialeigenschaften für Objekte (z.B. für Wände, Türen) und Modellierung des Verhaltens von Objekten,
- Modellierung der Gebäudehülle mittels volumetrischer Objekte für eine Erleichterung

der Kombination von CityGML-Daten mit Daten aus dem Bereich des Building Information Modeling (BIM).

Themenschwerpunkt „Überarbeitung des Level of Detail (LOD) Konzepts“: Die Möglichkeit, ein und dasselbe Objekt der realen Welt parallel in mehreren Detaillierungsgraden vorzuhalten, ist ein Kernkonzept des CityGML-Standards. Die in CityGML beschriebenen fünf LOD-Stufen haben ihren Weg in die allgemeine Fachterminologie für 3D-Stadtmodelle sowie in die nationale und internationale Standardisierung gefunden und werden auch unabhängig von CityGML verwendet. Anforderungen an eine Überarbeitung dieses Konzepts wurden in zweierlei Hinsicht identifiziert: Zum einen wurde eine exaktere Definition der LOD-Stufen in Kombination mit getrennten LODs für die Geometrie und die Semantik eines CityGML-Objekts gefordert. Zum anderen wurden das Fehlen von mehreren LOD-Stufen für den Innenraum bzw. die fehlende Möglichkeit, ein Gebäude in einer niedrigen LOD-Stufe im Außenraum zu modellieren und dennoch auch das Innere des Gebäudes abzubilden, als Schwächen von CityGML genannt. Als Fazit der kontroversen Diskussion zu diesem Themenschwerpunkt wurde festgehalten, dass wohlbegründete Anforderungen an eine Revision des LOD-Konzepts existieren, dass eine Änderung des Konzepts jedoch mit Bedacht und nach einer offenen Diskussion verschiedener Varianten durchgeführt werden sollte, um die Nutzer des Standards nicht zu verwirren und den Bezug zu den etablierten CityGML-LOD-Stufen nicht zu verlieren.

Themenschwerpunkt „thematische Erweiterungen von CityGML-Modulen“: Das CityGML-Datenmodell ist modular aufgebaut und erlaubt anwendungsspezifische Erweiterungen, so genannte Application Domain Extensions (ADEs). Ein Erweiterungsvorschlag für bestehende Module bzw. für die Definition neuer Module wurde im Workshop präsentiert: Eine CityGML-ADE für Ver- und Entsorgungsnetze, die Objektklassen für die Integration topologischer Netzwerke in CityGML definiert. Als Erweiterung des Gebäude-Moduls wurden unter anderem die Klassen Storey

für die explizite Repräsentation von Stockwerken sowie BuildingUnit für die Modellierung, z.B. einzelner Wohnungen oder Klimazonen innerhalb eines Gebäudes, vorgeschlagen. Neben der Forderung nach einer stärkeren Harmonisierung mit Modellen aus dem BIM-Bereich, speziell mit dem BIM-Standard IFC, wurde auch Bedarf für eine stärkere Verbindung mit IndoorGML, dem Entwurf eines Standards für den Bereich der Innenraumnavigation, gesehen. Weitere Vorschläge für die thematische Ergänzung von CityGML betrafen die Modellierung von Bauwerken, die nicht als Gebäude zu klassifizieren sind, z.B. Dämme, Schleusen, Zäune, sowie die Übernahme von gut gelösten Modellierungsdetails aus dem INSPIRE Gebäude-Thema. Vor dem Hintergrund, dass es sich beim CityGML-Standard nicht nur um ein Datenformat, sondern in erster Linie um ein standardisiertes semantisches Modell handelt, wurde im Sinne des Softwareentwicklungsansatzes Model-Driven-Architecture (MDA) eine stärkere Trennung von konzeptuellem Datenmodell (in UML beschrieben) und Datenformat (momentan XML/GML) gefordert. Ermöglicht werden soll damit die automatische Ableitung von zusätzlichen Datenformaten aus dem UML-Modell. Mittels eindeutiger Kodierungsregeln könnten so neben XML/GML auch Formate wie GeoJSON unterstützt werden. Weitere Anforderungen aus diesem Bereich betreffen die modellbasierte Ableitung von CityGML-ADEs, die Konformität des CityGML-UML-Modells zur Normenserie ISO 19100, die Unterstützung stabiler Objektidentifikatoren sowie die formale Beschreibung von Konformitätsbedingungen, um automatisierte Konformitätsprüfungen durchführen zu können.

Themenschwerpunkt „stärkere Harmonisierung mit 2D Kataster und weiteren bestehenden Datenmodellen“: Von Behördenvertretern aus den Niederlanden und Großbritannien wurden einige Anforderungen für diesen Themenschwerpunkt definiert. Diese betrafen unter anderem die Möglichkeit zur Modellierung von LOD0-Umringen für sämtliche CityGML-Klassen und der Einführung eines 3D-Kataster-Moduls mit der Möglichkeit, Eigentum innerhalb eines Gebäudes zu referenzieren und 2D-Grundrisse mit 3D-Gebäude-

modellen sowie Adressen zu integrieren. Als Beispiel für eine gelungene Integration von 2D- und 3D-Topographie wurde der niederländische Standard IMGeo präsentiert. Dieser definiert eine CityGML-ADE für ein großmaßstäbiges Topographiemodell und zeigt, dass sich CityGML nicht nur für die Modellierung von Städten, sondern auch für die Modellierung von Topographie im ländlichen Raum eignet.

Für die erfolgreiche Weiterentwicklung eines internationalen Standards ist die Berücksichtigung der Nutzeranforderungen von entscheidender Bedeutung. Der Workshop in München stellt einen wichtigen Schritt in diese Richtung dar; weitere Workshops sollten folgen, um aus CityGML 3.0 einen Erfolg zu machen.

Informationen zum Workshop inklusive der gezeigten Vortragsfolien stehen unter der Adresse http://en.wiki.modeling.sig3d.de/index.php/Workshop_Munich_2013 zur Verfügung.

Besonderer Dank gilt den lokalen Organisatoren, allen voran TATJANA KUTZNER, sowie den Sponsoren M.O.S.S. Computer Graphik Systeme GmbH, VirtualCITYSYSTEMS GmbH und dem Runder Tisch GIS e.V.

ANDREAS DONAUBAUER, München

24. Internationales CIPA Symposium, 2. – 6. September 2013, Straßburg, Frankreich

CIPA, (The International Committee for Documentation of Cultural Heritage, ehemals Comité International de Photogrammétrie Architecturale), besteht bereits seit 1968 als quasi bipolare Organisation, ist doch die Entstehung von CIPA dem Zusammenwirken der beiden großen Dachorganisationen ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) und ICOMOS (International Council on Monuments and Sites) als Träger zu verdanken. CIPA hat sich dementsprechend dem Anliegen verschrieben, die Experten, die unser Kulturerbe sichern, beschreiben, bewerten, dokumentieren, restaurieren und konservieren, zusammenzubringen mit denen, welche die technischen Vorausset-

zungen hierzu schaffen. CIPA richtet sich also an Teilnehmer der unterschiedlichen Fachgebiete wie Baudokumentation, Bauforschung und Restaurierung auf der einen Seite und Anbieter und Experten zu Aufnahmetechniken wie Photogrammetrie, Laserscanning und den inzwischen weiter entwickelten Möglichkeiten zur metrischen und bildlichen Erfassung und Darstellung auf der anderen Seite. Der Tagungsort Straßburg als Sitz des Europaparlaments und damit als Symbol für das Zusammenwachsen Europas und das zweiseitig, nämlich sowohl französisch als – historisch – auch deutsch geprägte Elsass boten eine gewisse Symbolkraft auch für das dauerhafte Bemühen, die beiden unterschiedlichen Bereiche der Anwender und der Anbieter von Know-how zur Wahrung des Kulturerbes zu verzahnen und gegenseitig existierende Verständnis- und Wissenslücken zu überbrücken. Entsprechend lautete das Motto dieses Symposiums: Recording, Documentation and Cooperation for Cultural Heritage.

Der Gastgeber des Symposiums, Prof. PIERRE GRUSSENMEYER, leitete durch die Eröffnungsveranstaltung am Montag, dem 2. September, die im prachtvollen großen Saal der zentral gelegenen Aubette, einem repräsentativen, klassizistischen Gebäude in Straßburg, stattfand. LAURENT POLIDORI, der Präsident der Société Française de Photogrammétrie et Télédétection (SFPT) berichtete über Arbeit und Bedeutung der SFPT für zahlreiche Anwendungszweige. SAMIR ABDULAC (ICOMOS France) hob die Zusammenarbeit der ICOMOS-Mitglieder aus unterschiedlichsten Sparten mit CIPA hervor. Nachdem MARIO SANTANA, der Präsident von CIPA, die Bedeutung der Sponsoren für die ansonsten nur von Freiwilligen getragene Organisation hervorhob und die Bedeutung von CIPA als Brücke zwischen Anwendern und Anbietern technischer Möglichkeiten in Zusammenhang mit dem Kulturerbe auch an Beispielen dargestellt hatte, nahm er sich der Vorgehensweise innerhalb der Zusammenarbeit an und entwickelte hierzu in einem programmatischen Vortrag Strategien anhand der fünf griffigen Schlüsselwörter wo, was, warum, wann und wie.

Das Vortragsprogramm startete bereits in der Eröffnungssitzung mit zwei Vorträgen

übergeordneter Thematik aus den beiden Kernbereichen Technik und Anwendung. Der erste Hauptredner, FABIO REMONDINO (Präsident der Technical Commission 5 der ISPRS), stellte in seinem Beitrag mit dem Titel „*3D Imaging and ranging for Cultural Heritage recording – Latest developments*“ neue Entwicklungen sowohl Hard- als auch Software betreffend vor, unterlegt von eindrucksvollen Beispielen. Hardwaremäßig sind mit den hochbeweglichen, teils selbststeuernden neuen Fluggeräten neue Aufnahmemethoden zu erwarten; auf Seiten der Software ermöglichen leistungsfähigere Rechner z. B. Online-Auswertungen. STEFANO DE CARO, Präsident von ICCROM (International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property) zeichnete den Weg der Dokumentation des Kulturerbes von den Anfängen bis in die heutige Zeit nach. Während die Eröffnungsveranstaltung in der hervorragend restaurierten Salle de l'Aubette stattfand, waren die Arbeitssitzungen an allen folgenden Tagen auf den Campus der großen Universität Straßburg in das Gebäude des Institut National des Sciences Appliquées (INSA) verlagert, an der als École publique d'Ingénieurs et d'Architectes das Vermessungswesen mit allen Disziplinen als eines von sieben ingenieurwissenschaftlichen Fachgebieten studiert werden kann. Neben den beiden Keynotes während der Eröffnungsveranstaltung richteten sich im Verlauf des Symposiums zwei weitere Hauptreferate an unterschiedlichen Tagen an das Plenum: Der Beitrag von DAVID MYERS und YANNIS AVRAMIDES in der Plenarsitzung am Dienstag stellte Projekt, Entwicklungsstand und Erfahrungen zum Informationssystem Arches in den Mittelpunkt (*An Open Source Inventory and Management System for the International Heritage Field*). Das vom Getty Conservation Institute und World Monuments Fund entwickelte System „Arches“ als neues netzbasiertes System speziell zu Bestandsaufnahme und Management des standortgebundenen Kulturerbes einschließlich archäologischer Stätten, Bauwerke und Kulturlandschaften ist inzwischen freigegeben und sieht der Praxiserprobung entgegen. In der dritten Plenarsitzung, eingeleitet durch eine Grußadresse des ISPRS-Präsidenten JUN CHEN sowie der Vorstellung der Planungen zum

ISPRS-Kongress 2016 in Prag durch die Kongressdirektorin LENA HALOUNOVÁ trug RAMTIN ATTAR (Autodesk Research) zum Thema Positioning Heritage in a World Designed around Technological Possibilities vor. Er gab einen Überblick über neuere Entwicklungen, die genutzt werden sollten, das bedrohte Kulturerbe zu dokumentieren. Anschließend an die Plenarsitzungen erhielten die Aussteller Gelegenheit, sich und ihre Produkte vorzustellen.

Abgesehen von den vier Hauptreferaten vor dem Plenum verteilten sich die übrigen Vorträge auf 27 Sitzungsblöcke, von denen wegen der großen Anzahl an Vortragenden erstmals stets drei und nicht nur zwei zeitgleich stattfanden, so dass die Qual der Wahl bei Überschneidung der Interessen noch wuchs. Die Sitzungen waren vier Themengruppen zugeordnet: 1. Methodik der Aufnahme des Kulturerbes, 2. GIS und Informationsmanagement des Kulturerbes, 3. Spezialgebiete, 4. Ausbildung, Training und Kommunikation in Zusammenhang mit dem Kulturerbe, wobei mit ca. 60 Beiträgen die überwältigende Anzahl der ca. 140 vorgetragenen Beiträge dem Themenkreis 1 zugeordnet war.

Parallel zum Vortragsteil fand im großen Ausstellungsraum eine stets gut besuchte Firmenpräsentation mit ca. 20 Ausstellern statt: Firmen, die Hardware anbieten, Softwareentwickler aus den Bereichen Datenaufbereitung, -management und GIS sowie Dienstleistungsunternehmen. Auch die Posterausstellung konzentrierte sich dort. Da auch die Kaffeepausen in den lichten Raum gelegt waren, hatten die Teilnehmer neben intensiven Gesprächen untereinander stets die Gelegenheit zum Austausch mit den Ausstellern und zur Diskussion über die Inhalte der Poster. Während zweier Postersessions standen ihnen zudem die Ersteller der Poster zum Meinungsaustausch zur Verfügung. Das Konzept, Firmen-, Posterausstellung, Pausencafé und Tagungsbüro in einem einzigen großen Raum zu vereinen, erwies sich als vorbildhaft kommunikationsfördernd.

Abgerundet wurde das Programm durch den Empfang des Vize-Bürgermeisters der Stadt Straßburg im prächtigen barocken Hauptsaal des Rathauses am Dienstag, Fachexkursionen am Mittwoch sowie das Galadinner im Pavillon Joséphine, einem Schösschen

im Herzen des Parc de l'Orangerie aus dem Beginn des 19. Jahrhunderts mit veritablen Störchen am Dach, am Donnerstag.

Die Teilnehmer waren sich einig: Selten zuvor war ein CIPA-Symposium derart gut geplant, waren die Bedürfnisse der Teilnehmer in jeder Hinsicht bedacht, erfolgte der Tagungsablauf so reibungslos und die gesell-

schaftlichen Zusammenkünfte so zwanglos harmonisch in bauhistorisch ausgesuchtem wechselndem äußeren Rahmen. Besonderer Dank geht deshalb an PIERRE GRUSSENMEYER und seinem engagierten Team hierfür in aller Namen. Die nächste CIPA findet im Zeitraum 31.8. – 5.9.2015 in Taipei, Taiwan, statt.

MICHAEL SCHERER, Bochum

Hochschulnachrichten

Universität Stuttgart, Dissertation Rongfu Tang

Herr M.Sc. RONGFU TANG promovierte am 28.5.2013 an der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie der Universität Stuttgart mit der Arbeit „*Mathematical Methods for Camera Self-Calibration in Photogrammetry and Computer Vision*“ zum Dr.-Ing.

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. DIETER FRITSCH, Universität Stuttgart,
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. CHRISTIAN HEIPKE, Leibniz Universität Hannover.

Abstract:

Camera calibration is a central subject in photogrammetry and geometric computer vision. Self-calibration is a most flexible and highly useful technique, and it plays a significant role in camera automatic interior/exterior orientation and image-based reconstruction. This thesis is to provide a mathematical, intensive and synthetic study on the camera self-calibration techniques in aerial photogrammetry, close range photogrammetry and computer vision.

In aerial photogrammetry, many self-calibration additional parameters (APs) are used increasingly without evident mathematical or physical foundations, and moreover they may be highly correlated with other correction parameters. In close range photogrammetry, high correlations exist between different terms in the “standard” self-calibration model of BROWN. The negative effects of those high correlations on self-calibration are not fully

clear. While distortion compensation is essential in the photogrammetric self-calibration, geometric computer vision concerns auto-calibration (known as self-calibration as well) in calibrating the internal parameters, regardless of distortion and initial values of internal parameters. Although camera auto-calibration from more than two views has been studied extensively in the last decades, it remains quite a difficult problem so far.

The mathematical principle of self-calibration models in photogrammetry is studied synthetically. It is pointed out that photogrammetric self-calibration (or building photogrammetric self-calibration models) can – to a large extent – be considered as a function approximation problem in mathematics. The unknown function of distortion can be approximated by a linear combination of specific mathematical basis functions. With algebraic polynomials being adopted, a whole family of Legendre self-calibration model is developed on the base of the orthogonal univariate Legendre polynomials. It is guaranteed by the Weierstrass theorem, that the distortion of any frame-format camera can be effectively calibrated by the Legendre model of proper degree. The Legendre model can be considered as a superior generalization of the historical polynomial models proposed by EBNER and GRÜN, to which the Legendre models of second and fourth orders should be preferred, respectively. However, from a mathematical viewpoint, the algebraic polynomials are undesirable for self-calibration purpose due to high correlations between polynomial terms. These high correlations are exactly those oc-

curing in BROWN's model in close range photogrammetry. They are factually inherent in all self-calibration models using polynomial representation, independent of block geometry. According to the correlation analyses, a refined model of the in-plane distortion is proposed for close range camera calibration.

After examining a number of mathematical basis functions, the Fourier series are suggested to be the theoretically optimal basis functions to build the self-calibration model in photogrammetry. Another family of Fourier self-calibration model is developed, whose mathematical foundations are the Laplace's equation and the Fourier theorem. By considering the advantages and disadvantages of the physical and the mathematical self-calibration models, it is recommended that the Legendre or the Fourier model should be combined with the radial distortion parameters in many calibration applications.

A number of simulated and empirical tests are performed to evaluate the new self-calibration models. The airborne camera tests demonstrate that, both the Legendre and the Fourier self-calibration models are rigorous, flexible, generic and effective to calibrate the distortion of digital frame airborne cameras of large-, medium- and small-formats, mounted in single- and multi-head systems (including the DMC, DMC II, UltraCamX, UltraCamXp, DigiCAM cameras and so on). The advantages of the Fourier model result from the fact that it usually needs fewer APs and obtains more reliable distortion calibration. The tests in close range photogrammetry show that, although it is highly correlated with the decentering distortion parameters, the principal point can be reliably and precisely located in a self-calibration process under appropriate image configurations. The refined in-plane distortion model is advantageous in reducing correlations with the focal length and improving the calibration of it. The good performance of the combined "Radial + Legendre" and "Radial + Fourier" models is illustrated.

In geometric computer vision, a new auto-calibration solution which needs image correspondences and zero (or known) skew parameter only is presented. This method is essentially based on the fundamental matrix and the three (dependent) constraints derived from the rank-2 essential matrix. The main virtues of this method are threefold. First, a recursive strategy is employed subsequently to a coordinate transformation. With an appropriate approximation, the recursion estimates the focal length and aspect ratio in advance and then calculates the principal point location. Second, the optimal geometric constraints are selected using error propagation analyses. Third, the final nonlinear optimization is performed on the four internal parameters via the Levenberg-Marquardt algorithm. This auto-calibration method is fast and efficient to obtain a unique calibration. Besides auto-calibration, a new idea is proposed to calibrate the focal length from two views without the knowledge of the principal point coordinates. Compared to the conventional two-view calibration techniques which have to know principal point shift a priori, this new analytical method is more flexible and more useful. Although the auto-calibration and the two-view calibration methods have not been fully matured yet, their good performance is demonstrated in both simulated and practical experiments. Discussions are made on future refinements.

Die Dissertation ist in der Reihe C der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (ISBN 978-3-7696-5115-7, ISSN 0065-5325) unter der Nr. 703 online veröffentlicht (<http://dgk.badw.de/index.php?id=12>). Gleichzeitig erscheint die Arbeit in elektronischer Form bei der Bibliothek der Universität Stuttgart (<http://elib.uni-stuttgart.de/opus/doku/e-diss.php>).

Neuerscheinungen

COMER, D.C. & HARROWER, M.J. (Hrsg.), 2013: *Mapping Archaeological Landscapes from Space*, 2013. Springer Briefs in Archaeology – Archaeological Heritage Management, Vol. 5. Springer-Verlag, 276 Seiten. ISBN 978-1-4614-6073-2.

This book offers a concise overview of air and spaceborne imagery and related geospatial technologies tailored to the needs of archaeologists. Leading experts including scientists involved in NASA's Space Archaeology program provide technical introductions to five sections: 1) Historic Air and Spaceborne Imagery, 2) Multispectral and Hyperspectral Imagery, 3) Synthetic Aperture Radar, 4) Lidar, and 5) Archaeological Site Detection and Modeling. Each of these five sections includes two or more case study applications that have enriched understanding of archaeological landscapes in regions including the Near East, East Asia, Europe, Meso- and North America.

HEUNECKE, O., KUHLMANN, H., WELSCH, W., EICHHORN, A. & NEUNER, H., 2013: *Handbuch*

Ingenieurvermessung – Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen, 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. – MÖSER, M., MÜLLER, G. & SCHLEMMER, H. (Hrsg.) *Handbuch Ingenieurvermessung*. Wichmann-Verlag, 688 Seiten. ISBN 978-3-87907-467-9.

Der Band „Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen“ beschreibt die Methoden und Modelle zur Erfassung und Interpretation geometrischer Veränderungen von Messobjekten. Da die Aufbereitung von Messergebnissen sowie die vielfältigen Möglichkeiten zu ihrer Analyse und Interpretation im fachübergreifenden Zusammenhang gesehen werden müssen, sind neben den bewährten geodätischen Vorgehensweisen auch die Grundlagen aus der Systemtheorie und der Mechanik behandelt sowie Techniken der Zeitreihentheorie und der künstlichen Neuralen Netze. In der Integration der Methoden liegt ein Schwerpunkt dieses Buches.

Das bekannte Standardwerk richtet sich an Praktiker, Wissenschaftler und Studierende aus Industrie, Forschung und Entwicklung.

Veranstaltungskalender

2013

26. – 29. November: **3D GeoInfo 2013** in **Istanbul**, Türkei. 3dgeoinfo.com

8. – 15. Dezember: **ICCV 2013**, International Conference on Computer Vision, **Sydney**, Australien. iccv2013.org

10. – 11. Dezember: **LowCost 3D** in **Berlin**. lc3d.net

12. – 13. Dezember: **3D NordOst 2013**. 3d-nordost.de

2014

27. – 29. Januar: **GIS Ostrava – Geoinformatics for Intelligent Transportation** in **Ostrava**, Tschechische Republik. gis.vsb.cz/gisostrava

1. – 6. Februar: **SPIE Photonics West 2014** in **San Francisco**, USA. spie.org/photonics-west.xml

12. – 14. Februar: **EuroCOW – the Calibration and Orientation Workshop** in **Castelldefels**, Barcelona, Spanien. eurocow.org

12. – 13. Februar: **Oldenburger 3D Tage in Oldenburg.** jade-hs.de/fachbereiche/bauwesen-und-geoinformation/geoinformation/oldenburger-3d-tage

24. – 26. März: **Workshop on the Applications of Computer Vision 2014** in Steamboat Springs, CO, USA. wacv14.org

14. – 17. April: **SPIE Photonics Europe 2014** in Brüssel, Belgien. spie.org/photonics-europe.xml

14. – 16. Mai: **ISPRS Technical Commission IV Symposium 2014** in Suzhou, China. isprs.org/2014tc4symposium

19. – 21. Mai: **ISPRS Technical Commission VI Symposium 2014** in Wuhan, China. lmars.whu.edu.cn/isprscm6

3. – 5. Juni: **European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR) 2014** in Berlin. eusar.de

16. – 21. Juni: **25. International FIG Congress 2014** in Kuala Lumpur, Malaysia. fig.net/fig2014

17. – 19. Juni: **Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) 2014** in Columbus, OH, USA. pamitc.org/cvpr14

23. – 25. Juni: **ISPRS Technical Commission V Symposium 2014** in Riva, Italien. isprs-commission5.fbk.eu

13. – 18. Juli: **International Geosience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2014** in Québec City, Kanada. igarss2014.com

24. – 28. August: **International Conference on Pattern Recognition (ICPR) 2014** in Stockholm, Schweden. icpr2014.org

5. – 7. September: **ISPRS Technical Commission III Symposium – Photogrammetric Computer Vision 2014** in Zürich, Schweiz. isprs.org/pcv2014

5. – 12. September: **European Conference on Computer Vision (ECCV) 2014** in Zürich, Schweiz. eccv2014.org

29. September – 2. Oktober: **ISPRS Technical Commission VII Symposium 2014** in Istanbul, Türkei.

6. – 8. Oktober: **ISPRS Technical Commission II Symposium 2014** in Toronto, Kanada. <http://www2.isprs.org/2014GeoTPMA/home.html>

27. – 30. Oktober: **International Conference on Image Processing (ICIP) 2014** in Paris, Frankreich. icip2014.com

17. – 20. November: **ISPRS Technical Commission I Symposium 2014** in Denver, CO, USA.

9. – 12. Dezember: **ISPRS Technical Commission VIII Symposium 2014** in Hyderabad, Indien.

Weitere Konferenzen und Workshops finden sich beispielsweise unter:
isprs.org/calendar/
iris.usc.edu/Information/Iris-Conferences.html

Jahresübersicht 2013

Vorstand der DGPF

Präsident

Prof. Dr. rer. nat. THOMAS H. KOLBE
Technische Universität München
Institut für Geodäsie, GIS und
Landmanagement
Lehrstuhl für Geoinformatik
Arcisstraße 21, 80333 München
Tel.: 089 / 289-23888
Fax: 089 / 289-22878
e-mail: thomas.kolbe@tum.de

Vizepräsident

Prof. Dr.-Ing. UWE STILLA
Technische Universität München
Fachgebiet Photogrammetrie und
Fernerkundung
Arcisstraße 21, 80333 München
Tel.: 089 / 289-22671
Fax: 089 / 289-23202
e-mail: stilla@tum.de

Sekretär

Prof. Dr.-Ing. EBERHARD GÜLCH
Hochschule für Technik Stuttgart
Fakultät Vermessung, Mathematik und
Informatik
Schellingstr. 24, 70174 Stuttgart
Tel.: 0711 / 8926-2610
Fax: 0711 / 8926-2556
e-mail: sekretaer@dgpf.de

Schatzmeister

Dr.-Ing. HERBERT KRAUSS
Rodenkirchener Straße 47, 50997 Köln
Tel.: 02233 / 22514
Fax: 032 222 / 427178
e-mail: mh.krauss@t-online.de

Hauptschriftleiter

Prof. Dr.-Ing. WOLFGANG KRESSE
Hochschule Neubrandenburg
Fachbereich Landschaftswissenschaften und
Geomatik
Brodaer Straße 2, 17033 Neubrandenburg
Tel.: 0395 / 5693-4106
Fax: 0395 / 5693-4999
e-mail: kresse@hs-nb.de

Beirat

Prof. Dr. CORNELIA GLÄSSER
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Institut für Geographie,
Von-Seckendorff-Platz 4, 06120 Halle
Tel.: 0345 / 55-260 20
Fax: 0345 / 55-271 68
e-mail: cornelia.glaesser@geo.uni-halle.de

Beirat

Dr. rer. nat. KLAUS-ULRICH KOMP
EFTAS Fernerkundung
Technologietransfer GmbH
Oststraße 2-18, 48145 Münster
Tel.: 0251 / 1330-70
Fax: 0251 / 1330-733
e-mail: klaus.komp@eftas.com

Beirat

Prof. Dr.-Ing. habil. HANS-GERD MAAS
Technische Universität Dresden
Professur für Photogrammetrie
Helmholtzstraße 10, 01062 Dresden
Tel.: 0351 / 463-32859
Fax: 0351 / 463-37266
e-mail: hans-gerd.maas@tu-dresden.de

Beirat

Prof. Dr.-Ing. MONIKA SESTER
Leibniz Universität Hannover
Institut für Kartographie und Geoinformatik
(ikg)
Appelstraße 9a, 30167 Hannover
Tel.: 0511 / 762-3588
Fax: 0511 / 762-2780
e-mail: monika.sester@ikg.uni-hannover.de

Beirat

Dr.-Ing. ECKHARDT SEYFERT
Landesvermessung und Geobasisinformation
Brandenburg
Heinrich-Mann-Allee 103, 14473 Potsdam
Tel.: 0331 / 8844-506
Fax: 0331 / 8844-126
e-mail: eckhardt.seyfert@geobasis-bb.de

Ehrenmitglieder der DGPF

Prof. Dr.-Ing. FRIEDRICH ACKERMANN, Stuttgart
 Prof. Dr.-Ing. WOLFGANG FÖRSTNER, Bonn
 Prof. GERD HILDEBRANDT, Freiburg
 Prof. Dr.-Ing. GOTTFRIED KONECNY, Hannover
 Direktor FRITZ ERICH KRAUSE, Münster
 Dipl.-Ing. HORST SCHÖLER, Stadtsteinach
 Prof. Dr.-Ing. KLAUS SZANGOLIES, Jena

In diesem Jahr verstarb Dr.-Ing. OTTO
 HOFMANN, Brunnthal

Neue Mitglieder der DGPF

Als neue persönliche Mitglieder begrüßt die
 DGPF

M.Sc. LI FANG, München
 B.Sc. ALEXANDER HANEL, Hohenlinden
 Dipl.-Ing. LUDWIG HOEGNER, München
 Dipl.-Geoökologe THOMAS HOLLANDS,
 Bremerhaven
 M.Sc. MARKUS IMMITZER, Wien, Österreich
 M.Sc. DOROTA IWASZCZUK, München
 M.Sc. RICHARD JUNG, Osnabrück
 ALICE KOCH, Zürich, Schweiz
 TOBIAS LOCHMANN, Wesenberg
 Dr.-Ing. JOCHEN MEADOW, Ettlingen
 Dipl.-Ing. MORITZ MENZE, Hannover
 M.Sc. MOHSEN MIRI, Berlin
 M.Sc. TESSIO NOVACK, München
 B.Sc. DANIEL OMELANOWSKY, Hamburg
 Dipl.-Ing. MARKO PILGER, Duisburg
 Dr.-Ing. MEHDI RAVANBAKHS, Melbourne,
 Australien
 CHRISTIAN REINERS, Köthen
 Dr. MARTIN SAUERBIER, Bern, Schweiz
 M.Sc. JOHANNES SCHNEIDER, Bonn
 Dr. rer. nat. ANNE SCHUCKNECHT, Freiberg
 Dipl.-Ing. DIRK STALLMANN, Langelsheim
 M.Sc. OKSANA STERN, Korlingen
 ANDREAS THARANG, Dresden
 FRANK THONFELD, Bonn
 Dipl.-Ing. (FH) ANNA MARIA TROSSET, Berlin
 NICLAS ZELLER, Karlsruhe

Arbeitskreise der DGPF

Aus- und Weiterbildung

Prof. Dr.-Ing. ANSGAR BRUNN
 Hochschule für angewandte Wissenschaften
 Würzburg-Schweinfurt
 Studiengang Vermessung und Geoinformatik
 Röntgenring 8, 97070 Würzburg
 Tel.: 0931 / 3511-8212
 Fax: 0931 / 3511-9510
 e-mail: ansgar.brunn@fhws.de

Dr.-Ing. GÖRRES GRENZDÖRFFER
 Universität Rostock, Agrar- und
 Umweltwissenschaftliche Fakultät
 Professur Geodäsie und Geoinformatik
 Justus-v.-Liebig-Weg 6, 18051 Rostock
 Tel.: 0381 / 498-3206
 Fax: 0381 / 498-3202
 e-mail: goerres.grenzdoerffer@uni-rostock.de

Auswertung von Fernerkundungs- daten

Prof. Dr. VOLKER HOCHSCHILD
 Physische Geographie und GIS
 Geographisches Institut
 Universität Tübingen
 Rümelinstraße 19–23, 72070 Tübingen
 Tel.: 07071 / 2975316
 Fax: 07071 / 295378
 e-mail: dgpf2013@geographie.uni-tuebingen.de

Bildanalyse und Bildverstehen

Dr.-Ing. UWE WEIDNER
 Karlsruher Institut für Technologie
 Institut für Photogrammetrie und
 Fernerkundung
 Englerstraße 7, 76131 Karlsruhe
 Tel.: 0721 / 608-43945
 Fax: 0721 / 608-48450
 e-mail: uwe.weidner@kit.edu

3D-Stadtmodelle

Dipl.-Ing. BETTINA PETZOLD
 Hessisches Landesamt für Bodenmanagement
 und Geoinformation
 Schaperstraße 16, 65195 Wiesbaden
 Tel.: 0611 / 535-5372
 Fax: 0611 / 535-5351
 e-mail: bettina.petzold@hvbh.hessen.de
 www.hvbh.hessen.de

Dipl.-Ing. EKKEHARD MATTHIAS
Freie und Hansestadt Hamburg, Landesbetrieb
Geoinformation und Vermessung
Sachsenkamp 4, 20097 Hamburg
Tel.: 040 / 428-26-5750
Fax: 040 / 428-26-5966
e-mail: ekkehard.matthias@gv.hamburg.de
www.geoinfo.hamburg.de

Fernerkundung in der Geologie

Dr. HANS-ULRICH WETZEL
GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ)
PB 1.5, Telegrafenberg, 14473 Potsdam
Tel.: 0331 / 288-1194
Fax: 0331 / 288-1192
e-mail: wetz@gfz-potsdam.de

Geoinformatik

Prof. Dr.-Ing. JAN-ERIK HAUNERT
Universität Osnabrück
Institut für Geoinformatik und
Fernerkundung (IGF)
Barbarastraße 22b, 49076 Osnabrück
Tel.: 0541 / 969-3964
Fax.: 0541 / 969-3939
e-mail: janhhaunert@uni-osnabrueck.de

Hyperspektrale Fernerkundung

Dr.-Ing. ANDRÁS JUNG
Geoinformatik und Fernerkundung
Institut für Geographie
Universität Leipzig
Johannisallee 19a, 04103 Leipzig
Tel.: 0341 / 9732785
Fax.: 0341 / 9738619
e-mail: andras.jung@uni-leipzig.de

Optische 3D-Messtechnik

Prof. Dipl.-Ing. THOMAS KERSTEN
HafenCity Universität Hamburg
Labor für Photogrammetrie & Laserscanning
Hebebrandstraße 1, 22297 Hamburg
Tel.: 040 / 428-27-5343
Fax: 040 / 428-27-5359
e-mail: thomas.kersten@hcu-hamburg.de,
www.hcu-hamburg.de/geomatik/kersten

Radarfernerkundung und Flugzeug-laserscanning

Prof. Dr.-Ing. UWE SÖRGEL
Leibniz Universität Hannover
Institut für Photogrammetrie und
GeoInformation
Nienburger Straße 1, 30167 Hannover
Tel.: 0511 / 762-2981
Fax: 0511 / 762-2483
e-mail: soergel@ipi.uni-hannover.de

Recht und Geodaten

Ansprechpartnerin DGPF: Dipl.-Ing.
MARTINA BRAUNE
Landesvermessung und Geobasisinformation
Brandenburg
Heinrich-Mann-Allee 103, 14473 Potsdam
Tel.: 0331 / 8844-330
e-mail: martina.braune@geobasis-bb.de

Leiter (DGfK): Dipl.-Ing. DIETRICH DIEZ
Landesamt für Geoinformation und
Landentwicklung Baden-Württemberg
Büchsenstraße 54, 70174 Stuttgart
Tel.: 0711 / 95980-101
e-mail: dietrich.diez@lgl.bwl.de

Sensoren und Plattformen

Prof. Dr. NORBERT HAALA
Universität Stuttgart
Institut für Photogrammetrie
Geschwister-Scholl-Straße 24d,
70174 Stuttgart
Tel.: 0711 / 685-83383
Fax: 0711 / 685-83297
e-mail: norbert.haala@ifp.uni-stuttgart.de

Standardisierung und Qualitätssicherung

Dipl.-Ing. SVEN BALTRUSCH
Landesamt für Innere Verwaltung
Mecklenburg-Vorpommern
Amt für Geoinformation, Vermessung und
Katasterwesen
Lübecker Straße 289, 19059 Schwerin
Tel.: 0385 / 588-56322
e-mail: sven.baltrusch@laiv-mv.de

Berichterstatter für ISPRS und CIPA

Kommission I – Image Data Acquisition – Sensors and Platforms

Dr.-Ing. FRANZ KURZ
82230 Oberpfaffenhofen
e-mail: franz.kurz@dlr.de

Kommission II – Theory and Concepts of Spatial Information Science

Prof. Dr.-Ing. MONIKA SESTER
30167 Hannover
e-mail: monika.sester@ikg.uni-hannover.de

Kommission III – Photogrammetric Computer Vision and Image Analysis

Prof. Dr.-Ing. STEFAN HINZ
76128 Karlsruhe
e-mail: stefan.hinz@kit.edu

Kommission IV – Geodatabases and Digital Mapping

Dr.-Ing. VOLKER WALTER
70174 Stuttgart
e-mail: volker.walter@ifp.uni-stuttgart.de

Kommission V – Close-Range Sensing: Analysis and Applications

Dr.-Ing. DANILO SCHNEIDER
01062 Dresden
e-mail: danilo.schneider@tu-dresden.de

Kommission VI – Education and Outreach

Dipl.-Inf. GERT KÖNIG
10623 Berlin
e-mail: gerhard.koenig@tu-berlin.de

Kommission VII – Thematic Processing, Modeling and Analysis of Remotely Sensed Data

Dr.-Ing. UWE WEIDNER
76128 Karlsruhe
e-mail: weidner@ipf.uni-karlsruhe.de

Kommission VIII – Remote Sensing Applications and Policies

Prof. Dr. IRMGARD NIEMEYER
52425 Jülich
e-mail: i.niemeyer@fz-juelich.de

CIPA – Internationales Komitee für Architekturphotogrammetrie

Prof. Dr.-Ing. MICHAEL SCHERER
44780 Bochum
e-mail: michael.scherer@ruhr-uni-bochum.de

Gutachter der PFG im Jahr 2013

Gute und unabhängige Gutachten garantieren die Qualität einer wissenschaftlichen Zeitschrift und sind essenziell für ihre internationale Anerkennung und die Aufnahme in einen Citation Index. Deshalb bedanken sich die Schriftleiter der PFG bei den Gutachterinnen und Gutachtern des Jahres 2013 ganz herzlich. Sie haben neben dem Editorial Board wesentlich zur positiven Entwicklung der PFG beigetragen. Ein ganz herzliches Dankeschön an:

- Hamza Alkhatib, Hannover
- Anton Andriyenko, Darmstadt
- Clemens Atzberger, Wien, Österreich
- Sven Baltrusch, Schwerin
- Timo Balz, Wuhan, China
- Ellen Banzhaf, Leipzig
- Georg Bareth, Berlin
- Frauke Becker, Bonn
- Susanne Becker, Stuttgart
- Thomas Blaschke, Salzburg, Österreich
- Pascal Bonnefond, Valbonne, Frankreich
- Claus Brenner, Hannover
- Christian Briebe, Wien, Österreich
- Tilman Bucher, Berlin
- Dimitri Bulatov, Ettlingen
- Christopher Conrad, Würzburg
- Denise Dettmering, München
- Timo Dickscheid, Bonn
- Martin Drauschke, Neubiberg
- Henri Eisenbeiss, Zürich, Schweiz
- Stefan Erasm, Göttingen
- Saskia Esselborn, Potsdam
- Clive Fraser, Melbourne, Australien
- Othmar Frey, Zürich, Schweiz

- Markus Gerke, Enschede, Niederlande
- Richard Gloaguen, Freiberg
- Anne Grote, Helsinki, Finnland
- Sebastian Günthert, Heidelberg
- Olaf Hellwich, Berlin
- Volker Hochschild, Tübingen
- Angela Hof, Bochum
- Patrick Hostert, Berlin
- Karsten Jacobsen, Hannover
- Boris Jutzi, Karlsruhe
- Helmut Kager, Wien, Österreich
- Wolfgang Kainz, Wien, Österreich
- Martin Kappas, Göttingen
- Birgit Kleinschmit, Berlin
- Thomas Kolbe, München
- Kourosh Koshelham, Enschede, Niederlande
- Peter Krzystek, München
- Reik Leiterer, Zürich, Schweiz
- Derek Lichti, Calgary, Kanada
- Frank Liebold, Dresden
- Fabian Löw, Würzburg
- Marc Löwner, Braunschweig
- Ralf Ludwig, München
- Hans-Gerd Maas, Dresden
- Stephan Mäs, Dresden
- Ioannis Manakos, Thessaloniki, Griechenland
- Helmut Mayer, Neubiberg
- Jochen Meidow, Ettlingen
- Philipp Meixner, Wien, Österreich
- Gunter Menz, Bonn
- Eckart Michaelsen, Ettlingen
- Matthias Möller, Berlin
- Daniel Muhle, Hannover
- Maik Netzband, Bochum
- Ingo Neumann, Hannover
- Martin Nitschke, Neubrandenburg
- Jens-André Paffenholz, Hannover
- Viorica Patraucean, Paris, Frankreich
- Edzer Pebesma, Münster
- Norbert Pfeifer, Wien, Österreich
- Matthias Plaue, Berlin
- Heinz-Jürgen Przybilla, Bochum
- Peter Reinartz, Oberpfaffenhofen
- Alexander Reiterer, Freiburg
- Fabio Remondino, Trento, Italien
- Camillo Ressler, Wien, Österreich
- Jochen Schiewe, Hamburg
- Konrad Schindler, Zürich, Schweiz
- Patric Schlager, Hohenheim
- Benno Schmidt, Bochum
- Andreas Schmitt, Oberpfaffenhofen
- Danilo Schneider, Dresden
- Karsten Schulz, Ettlingen
- Alexander Schunert, Hannover
- Markus Seifert, München
- Monika Sester, Hannover
- Alexander Siegmund, Heidelberg
- Gregory Stensaas, Sioux Falls, South Dakota, USA
- Hannes Taubenböck, Oberpfaffenhofen
- Hans-Peter Thamm, Berlin
- Daniel Tomowski, Clausthal-Zellerfeld
- Charles Toth, Columbus, Ohio, USA
- Thomas Udelhoven, Trier
- Lutz Vetter, Neubrandenburg
- Uwe Voges, Münster
- Jan Dirk Wegner, Zürich, Schweiz
- Horst Weichelt, Berlin
- Susanne Wenzel, Bonn
- Geoff West, Perth, Australien
- Manfred Wiggenhagen, Hannover
- Nils Wolf, Bochum
- Andreas Wytzisk, Bochum
- Michael Yang, Hannover
- Francesco Zucca, Pavia, Italien

Korporative Mitglieder

Firmen

AEROWEST GmbH
 AICON 3D Systems GmbH
 aphos Leipzig AG
 Becker GeoInfo GmbH
 Bernhard Harzer Verlag GmbH
 BlackBridge AG
 Blom Deutschland GmbH
 Brockmann Consult GmbH
 bsf swissphoto GmbH
 Büro Immekus
 CGI Systems GmbH
 DB Netz AG
 DELPHI IMM GmbH
 Deutsches Bergbau-Museum
 EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH
 ESG Elektroniksystem- und Logistik-GmbH
 Esri Deutschland GmbH
 EUROPEAN SPACE IMAGING
 Eurosense GmbH
 fokus GmbH
 g.on experience gmbh
 GAF 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 Ingenieurbüro für Luftbilddauswertung und Vermessung
 Infoterra GmbH
 INVERS - Industrievermessung & Systeme
 ITT Visual Information Solutions Germany
 J. Linsinger ZT-GmbH
 Leica Geosystems GmbH
 Luftbilddatenbank-Würzburg
 Messbildstelle GmbH
 Microsoft Photogrammetry
 MILAN Geoservice GmbH
 M.O.S.S. Computer Grafik Systeme GmbH
 PHOENICS GmbH
 PMS - Photo Mess Systeme AG
 RIEGL Laser Measurement Systems GmbH
 RWE Power AG, Geobasisdaten/Markscheidewesen
 technet GmbH
 Terra-Messflug GmbH
 topometric 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
 Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz

Hessisches LA für Bodenmanagement und Geoinformation
 Innenministerium NRW, Gruppe Vermessungswesen
 Institut für Umwelt- und Zukunftsforschung
 LA für Geoinformation und Landentwicklung, BW
 LA für Vermessung und Geoinformation, Bayern
 LB Geoinformation und Vermessung, Hamburg
 LB für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz, SH
 Landeshauptstadt Düsseldorf, Vermessungs- und Liegenschaftsamt
 Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen
 Märkischer Kreis, Vermessungs- und Katasteramt
 Regierungspräsident Tübingen, Abt. 8 Forstdirektion
 Regionalverband Ruhr
 Staatsbetrieb Sachsenforst Pirna
 Stadt Bocholt, Fachbereich 31
 Stadt Köln, Amt für Liegenschaften, Vermessung und Kataster
 Stadt Wuppertal, Vermessung, 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, Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik
 Jade Hochschule, Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik
 HCU HafenCity Universität Hamburg, Geomatik
 HfT Stuttgart, Vermessung und Geoinformatik
 HS Bochum, FB Vermessung und Geoinformatik
 HS Karlsruhe, Fakultät für Geomatik
 HTW Dresden, FB Vermessungswesen/Kartographie
 LUH Hannover, Institut für Kartographie und Geoinformatik
 LUH Hannover, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation
 MLU Halle, FG Geofernerkundung
 Ruhr-Uni Bochum, Geographisches Institut
 RWTH Aachen, Geodätisches Institut
 TU Bergak. Freiberg, Institut für Markscheidewesen und Geodäsie
 TU Berlin, Computer Vision & Remote Sensing
 TU Berlin, Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik
 TU Braunschweig, Institut für Geodäsie und Photogr.
 TU Clausthal, Institut für Geotechnik und Markscheidewesen
 TU Darmstadt, Institut für Photogrammetrie und Kartographie
 TU Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung
 TU München, FG Photogrammetrie und Fernerkundung
 TU Wien, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung
 Uni Bonn, Institut für Photogrammetrie
 Uni Göttingen, Institut für Waldinventur und Waldwachstum
 Uni Heidelberg, IWR Interdisziplinäres Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen
 Uni Kassel, FB Ökologische Agrarwissenschaften
 Uni Kiel, Geographisches Institut
 Uni Stuttgart, Institut für Photogrammetrie
 Uni Würzburg, Geographisches Institut
 Uni zu Köln, Geographisches Institut

PFG – Jahrgang 2013, Heft 1–6

Inhaltsverzeichnis Jahrgang 2013

ALTROGGE, G. & KOMP, K.-U.: Guest-Editorial: 25 Years of Development to Improve Earth Observation and Processing of Geoinformation	409
JÜRGENS, C., MICHEL, U. & WEICHELT, H.: Schwerpunktheft Fernerkundung	137
KRESSE, W.: Schwerpunktheft zur Photogrammetrie an der Universität Bonn	249

Originalbeiträge, alphabetisch nach Autoren

AGHABABAEI, H., AMINI, J., TZENG, Y.-C. & SRI SUMANTYO, J.T.: Unsupervised Change Detection on SAR images using a New Fractal-Based Measure	209
ALIDOOST, F., MOBASHERI, M.R. & ABKAR, A.A.: Introducing a Method for Spectral Enrichment of the High Spatial Resolution Images	31
BENDIG, J., BOLTEN, A. & BARETH, G.: UAV-based Imaging for Multi-Temporal, very high Resolution Crop Surface Models to monitor Crop Growth Variability	551
BRANDENBURGER, W., DRAUSCHKE, M. & MAYER, H.: Cornice Detection Using Façade Image and Point Cloud	511
DEGHANI, M., VALADAN ZOEJ, M.J. & ENTEZAM, I.: Neural Network Modelling of Tehran Land Subsidence Measured by Persistent Scatterer Interferometry	5
DICKSCHEID, T. & FÖRSTNER, W.: A Trainable Markov Random Field for Low-Level Image Feature Matching with Spatial Relationships	269
ERASMI, S.: Habitat Mapping from Optical and SAR Satellite Data: Implications of Synergy and Uncertainty for Landscape Analysis	139
FITZNER, D., SESTER, M., HABERLANDT, U. & RABIEL, E.: Rainfall Estimation with a Geosensor Network of Cars – Theoretical Considerations and First Results	93
FÖRSTNER, W.: Photogrammetrische Forschung – Eine Zwischenbilanz aus Bonner Sicht	251
FÖRSTNER, W.: Graphical Models in Geodesy and Photogrammetry	255
GNYP, M., YU, K., AASEN, H., YAO, Y., HUANG, S., MIAO, Y. & BARETH, G.: Analysis of Crop Reflectance for Estimating Biomass in Rice Canopies at Different Phenological Stages	351
KHAZAI, S., SAFARI, A., MOJARADI, B. & HOMAYOUNI, S.: Performance Comparison of Contemporary Anomaly Detectors for Detecting Man-Made Objects in Hyperspectral Images	19
LEITERER, R., MÜCKE, W., MORS DORF, F., HOLLAUS, M., PFEIFER, N. & SCHAEPMAN, M.E.: Flugzeuggestütztes Laserscanning für ein operationelles Waldstrukturmonitoring	173
LENZANO, M.G.: Assessment of using ASTER-derived DTM for Glaciological Applications in the Central Andes, Mt. Aconcagua, Argentina	197

MEINEL, G. & BURCKHARDT, M.: Die Geobasisprodukte Hausumringe und Hauskoordinaten – Charakterisierung und Aufbereitung für Gebäudebestandsanalysen	575
MENZE, M., KLINGER, T., MUHLE, D., METZLER, J. & HEIPKE, C.: A Stereoscopic Approach for the Association of People Tracks in Video Surveillance Systems	83
SCHIEWE, J. & KINKELDEY, CH.: Konzeption und Implementierung einer fallspezifischen Unsicherheitskette im Rahmen fernerkundlicher Auswertungen	563
SCHINDLER, F. & FÖRSTNER, W.: DijkstraFPS: Graph Partitioning in Geometry and Image Processing	285
SCHLAGER, P., KRISMANN, A., WIEDMANN, K., HILTSCHER, H., HOCHSCHILD, V. & SCHMIEDER, K.: Multisensorale, objektbasierte und GIS gestützte Klassifizierung von Grünlandbiotoptypen im Biosphärengebiet Schwäbische Alb	163
SCHMIDT, A., ROTTENSTEINER, F. & SÖRGEL, U.: Water-Land-Classification in Coastal Areas with Full Waveform Lidar data	71
SCHNEIDER, J. & FÖRSTNER, W.: Bundle Adjustment and System Calibration with Points at Infinity for Omnidirectional Camera Systems	309
STEFFEN, R.: A Robust Iterative Kalman Filter Based On Implicit Measurement Equations	323
SUCHENWIRTH, L., FÖRSTER, M., LANG, F. & KLEINSCHMIT, B.: Estimation and Mapping of Carbon Stocks in Riparian Forests by using a Machine Learning Approach with Multiple Geodata	333
TIEDE, D., FÜREDER, P., LANG, S., HÖBLING, D. & ZEIL, P.: Automated Analysis of Satellite Imagery to provide Information Products for Humanitarian Relief Operations in Refugee Camps – from Scientific Development towards Operational Services	185
TOSCANI, P., IMMITZER, M. & ATZBERGER, C.: Texturanalyse mittels diskreter Wavelet Transformation für die objektbasierte Klassifikation von Orthophotos	105
WENZEL, S. & FÖRSTNER, W.: Finding Poly-Curves of Straight Line and Ellipse Segments in Images	297
WESTFELD, P. & MAAS, H.-G.: Integrated 3D Range Camera Self-Calibration	589
WOLF, N.: Object Features for Pixel-based Classification of Urban Areas Comparing Different Machine Learning Algorithms	149

Beiträge aus Wissenschaft und Praxis

BANNEHR, L., SCHMIDT, A., PIECHEL, J. & LUHMANN, T.: Extracting Urban Parameters of the City of Oldenburg from Hyperspectral, Thermal, and Airborne Laser Scanning Data	367
BUCK, O., KLINK, A., GARCÍA MILLÁN, V.E., PAKZAD, K. & MÜTERTHIES, A.: Image Analysis Methods to Monitor Natura 2000 Habitats at Regional Scales – the MS.MONINA State Service Example in Schleswig-Holstein, Germany	415

BÜKER, C. & LETTAU, T.: Die Reform der Gemeinsamen Agrarpolitik – Möglichkeiten und Grenzen der Fernerkundungskontrolle	437
CRAMER, M., HAALA, N., ROTHERMEL, M., LEINSS, B. & FRITSCH, D.: UAV@LGL – Pilotstudie zum Einsatz von UAV im Rahmen der Landesvermessung in Deutschland	495
GARCÍA MILLÁN, V.E., TEUWSEN, S. & PAKZAD, K.: GMES4Mining – Description of a Flooding Process in Mining Areas using spectral Indices on multi-temporal Landsat Imagery	427
HAUB, C., KLEINWILLINGHÖFER, L., BROCKMANN, J., KOMP, K.-U. & GILLIAMS, S.: Monitoring Services for Food Security – Successful Transfer of Technology to the Sudanese Government	459
HAUB, C., QUILITZ, K., LINDEMANN, D. & LESKINEN, E.: Surveying European Landscape Dynamics	473
JACOBSEN, C.: DEM Generation from High Resolution Satellite Imagery	483
RÖSSMANN, H., PEYKER, J., VÖLKER, A. & KLINK, A.: Einsatz von Change-Detection-Methoden bei der Fortführung von Versiegelungs- und Gebäudedatenbeständen	447
SCHMITT, M., MAGNARD, CH., STANKO, S., ACKERMANN, CH. & STILLA, U.: Advanced High Resolution SAR Interferometry of Urban Areas with Airborne Millimetrewave Radar	603
SHAO, Y., DI, L., BAI, Y., KANG, L., WANG, H. & YANG, C.: Federated Catalogue for Discovering Earth Observation Data	43
STOTER, J., LEDOUX, H., REUVERS, M., VAN DEN BRINK, L., KLOOSTER, R., JANSSEN, P., BEETZ, J., PENNINGA, F. & VOSSELMAN, G.: Establishing and implementing a national 3D Standard in The Netherlands	381
TRUONG, H., BEN HMIDA, H., BOOCHS, F., HABED, A., CRUZ, C., VOISIN, Y. & NICOLLE, C.: Automatic Detection and Classification of Objects in Point Clouds using multi-stage Semantics	221

Berichte und Mitteilungen

Deutsche Geodätische Kommission (DGK): 60 Jahre	127
---	-----

Berichte von Veranstaltungen

22. ISPRS-Kongress 2012 in Melbourne, Australien	53
12th European Conference on Computer Vision (ECCV), Florenz, Italien.	62
ISPRS-Kommission VIII, 22. ISPRS Kongress in Melbourne, Australien	123
Racurs 12th International Scientific and Technical Conference, 24.–27. September 2012, Portimão, Portugal	124
Dreiländertagung D – A – CH (DGPF, OVG und SGPF) und 33. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 27.2.–1.3.2013, in Freiburg	393
12. Oldenburger 3D-Tage, 13.–14.2.2013	394
ISPRS Workshop „High Resolution Earth Imaging for Geospatial Information“, 21. – 24.5.2013, Hannover	533
Fachtagung „Mobile Mapping“, 19.6.2013, Muttensz, Schweiz	535
16th Brazilian Remote Sensing Symposium, 13. – 18.4.2013, Foz do Iguaçu, Brasilien	537
12. Internationales 3D-Forum Lindau, 19. und 20.3.2013	538
Geospatial World Forum, 13. – 21. May 2013, Rotterdam, The Netherlands.	619

International SIG 3D and OGC Workshop on Requirements for CityGML 3.0, 20. – 21. Juni 2013, Technische Universität München	620
24. Internationales CIPA Symposium, 2. – 6. September 2013, in Straßburg, Frankreich	622
Berichte der Arbeitskreise der DGPF	
Aus- und Weiterbildung	523
Bildanalyse und Bildverstehen	523
Hyperspektrale Fernerkundung	524
Radarfernerkundung und Flugzeuglaserscanning	525
Standardisierung und Qualitätssicherung	526
Optische 3D-Messtechnik	527
Fernerkundung in der Geologie	529
Sensoren und Plattformen	530
3D-Stadtmodelle	531
DGfG-AK Fernerkundung und DGPF-AK Auswertung von Fernerkundungsdaten	532
Persönliches	
Nachruf auf Enrico Clerici	128
Nachruf auf Otto Hofmann	239
Nachruf auf Ákos Detreköi	240
Hochschulnachrichten	125, 126, 239, 396, 540, 624
Neuerscheinungen	64, 241, 542, 626
Mitteilung der DGPF	543
Veranstaltungskalender	65, 129, 242, 402, 544, 626
In eigener Sache	401
Zum Titelbild	
Heft 1: Second International Conference on Agro-Geoinformatics	
Heft 2: Satellitenaufnahmen der Herrengäuser Gärten in Hannover	
Heft 3: TerraSAR-X ScanSAR-Mode-Aufnahme des Nam Co Sees in Zentral-Tibet	
Heft 4: Hauptgebäude der Universität Bonn mit Bildern von Arbeiten am dortigen Institut für Photogrammetrie	
Heft 5: Riparian Zone Monitoring along the River Eider in the framework of European Biodiversity Preservation	
Heft 6: UAV-based imaging for multi-temporal very high resolution crop surface models (CSMs) to monitor crop growth variability	
Korporative Mitglieder	66, 130, 243, 403, 545, 634
Vorstand der DGPF	628
Ehrenmitglieder der DGPF	629
Neue Mitglieder der DGPF	629
Arbeitskreise der DGPF	629
Berichterstatte für ISPRS und CIPA	631
Gutachter der PFG im Jahr 2013	632