

# PRG

# Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation

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

Jahrgang 2009, Heft 3

Hauptschriftleiter:  
Prof. Dr.-Ing. Helmut Mayer

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

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



E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung  
(Nägele u. Obermiller) Stuttgart 2009



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

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



International Society  
for Photogrammetry  
and Remote Sensing

**DAGM**

Deutsche Arbeits-  
gemeinschaft für  
Mustererkennung e.V.



Herausgeber:

© 2009 Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V.  
Präsidentin: Prof. Dr. Cornelia Gläßer, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geo-  
wissenschaften, Von-Seckendorff-Platz 4, D-06120 Halle, Tel.: +49(0)345 55-26020  
Geschäftsstelle: Dr. Klaus-Ulrich Komp, c/o EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH,  
Oststraße 2–18, D-48145 Münster, e-mail: klaus.komp@eftas.com

Published by:

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

© Gedruckt auf alterungsbeständigem Papier nach ISO 9706-1994

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

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

Verantwortlich für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren.

ISSN 1432-8364

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

Erscheinungsweise: 6 Hefte pro Jahrgang.

Bezugspreis im Abonnement: € 185,- pro Jahrgang. Mitglieder der DGPF erhalten die Zeitschrift kosten-  
los. Der Online-Zugang ist im Abonnement-Preis enthalten, Mitglieder der DGPF erhalten ihn kostenlos.

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

e-mail: mail@schweizerbart.de, Internet: <http://www.schweizerbart.de>

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

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

## PFG – Jahrgang 2009, Heft 3 Inhaltsverzeichnis

---

### **Originalbeiträge “Historic Maps and Imagery for Modern Scientific Applications”**

RIEKE-ZAPP, D., ROSENBAUER, R., RUTHISHAUSER, S. & REITERER, A.: Editorial . . . . .	189
HORST, T: Manuscript Maps as Sources for Cultural History and the History of Climatology . . . . .	191
JEDRZEJAS, T. & PRZYBILLA, H.-J.: Aufbau historischer 3D-Szenarien am Beispiel der mittelalterlichen Stadt Duisburg . . . . .	199
NEBIKER, S., BARMETTLER, A., FISCHER, B. & WEBER, E.: Vom physikalischen Stadtmodell zum historischen 3D-GIS – Anforderungen und Lösungsansätze am Beispiel des historischen Solothurns . . . . .	209
HENZE, F., LEHMANN, H. & BRUSCHKE, B.: Nutzung historischer Pläne und Bilder für die Stadtforschungen in Baalbek/Libanon . . . . .	221
STICHELBAUT, B. & BOURGEOIS, J.: The Aerial Imagery of World War One: A Unique Source for Conflict and Landscape Archaeology . . . . .	235
HECK, V. & VOGEL, S.: Rectification of Historic Royal Air Force Aerial Photos and Generation of an Aerial Image Mosaic of the Sarno River Basin, Italy . . . . .	245
GALIATSATOS, N.: The Shift from Film to Digital Product: Focus on CORONA Imagery . . .	251

### **Originalbeiträge**

HEBEL, M. & STILLA, U.: Automatische Koregistrierung von ALS-Daten aus mehreren Schrägansichten städtischer Quartiere . . . . .	261
STRAUB, C., DEES, M., WEINACKER, H. & KOCH, B.: Using Airborne Laser Scanner Data and CIR Orthophotos to Estimate the Stem Volume of Forest Stands . . . . .	277

---

### **Berichte und Mitteilungen**

Berichte von Veranstaltungen 8. Oldenburger 3D-Tage vom 28.–29. Januar 2009 . . . . .	289
Veranstaltungskalender . . . . .	292
Zum Titelbild . . . . .	293
Korporative Mitglieder . . . . .	294

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





## Editorial: Historic Maps and Imagery for Modern Scientific Applications

DIRK RIEKE-ZAPP, RALPH ROSENBAUER & SUSANNE RUTHISHAUSER, Bern, Schweiz;  
ALEXANDER REITERER, Wien, Österreich

Ebenso wie die Aufnahmen der Königlich-Preussischen Messbildanstalt (u. a. mit der Messbildkamera von ALBRECHT MEYDENBAUER; siehe Titelbild) in der Denkmalpflege kommt auch in den Geowissenschaften der Auswertung historischer Plan- und Bilddaten eine immer grössere Bedeutung zu. Der Rückgriff auf solche Bestandsdaten – sei es in der Form von Stichen, Gemälden, Karten oder auch der ersten Satellitenbilder – ist wesentlicher Teil der angewandten Forschung in zahlreichen akademischen Disziplinen. Dies zeigt sich insbesondere in den Geowissenschaften, welche sich mit der Veränderung der Landschaft im Verlauf größerer Zeiträume beschäftigen, um Klima- und Landschaftswandel quantifizieren zu können. Forscher, die sich dieser historischen Quellen bedienen, müssen sowohl mit der Entstehungsgeschichte dieser Produkte, als auch der dafür verwandten Messtechniken vertraut sein, um besten Nutzen aus ihnen ziehen zu können.

Ende November 2008 trafen sich rund einhundert Wissenschaftler aus acht Ländern in der Schweiz, um an der interdisziplinären Konferenz „Historic Maps and Imagery for Modern Scientific Applications“ in Bern die Ergebnisse ihrer Forschung vorzustellen. Die Tagung diente insbesondere auch als Plattform für Nachwuchswissenschaftler zum Austausch von Ideen und Analysemöglichkeiten für die Erschließung historischer Plan- und Bilddaten für aktuelle Forschungen. Die vorgestellten Themen reichten von urbanistischen Fragestellungen über Methoden zur Auswertung von historischen Luft- und Satellitenbildern bis hin zu Anwendungen in der Klimaforschung.

Die aktuelle Ausgabe der PFG beinhaltet eine Sammlung von Beiträgen, die aus den

Präsentationen der Tagung in Bern hervorgegangen sind:

THOMAS HORST beschreibt in seinem Beitrag, inwieweit forensische Karten, deren Ursprünge bis in das 16. Jahrhundert zurückreichen, heute als wichtige Quellen für die Klimageschichte dienen können.

In zahlreichen Museen werden heute aufwändige maßstäbliche Rekonstruktionen von Bauten oder ganzen Städten ausgestellt, in deren Ausführung in vielen Fällen die Erkenntnisse aus mehreren Jahrzehnten andauernder Ausgrabungs- und Forschungstätigkeit eingeflossen sind. THOMAS JEDRZEJAS & HEINZ-JÜRGEN PRZYBILLA und STEPHAN NEBIKER et al. zeigen in ihren Beiträgen auf, wie diese traditionellen verkleinerten Nachbauten in moderne virtuelle 3D-Modelle überführt werden können. Die Digitalisierung dieser Modelle und ihre Bereitstellung im Internet erlaubt es, sie einem wesentlich größeren Personenkreis zugänglich zu machen und zugleich diachrone Entwicklungen interaktiv zu präsentieren.

FRANK HENZE et al. beleuchten anhand des Beispiels von Baalbek, wie sich mit historischen Photographien (unter anderem von ALBRECHT MEYDENBAUER) und Plänen die Entwicklung einer Stadt nachvollziehen lässt, und die dabei wirkenden Transformationsprozesse sichtbar gemacht werden können.

BIRGER STICHELBOU & JEAN BOURGEOIS verdeutlichen das vielfach noch unerschlossene Potential von Luftbildern aus dem 1. Weltkrieg für die Landschafts- und Konfliktarchäologie anhand von Beispielen aus Frankreich und Belgien. Mit Aufnahmen aus dem 2. Weltkrieg beschäftigen sich VOLKER HECK & SEBASTIAN VOGEL, die eindrucksvoll demonstrieren, wie sich diese in großer Anzahl in verschiedenen Archiven erhaltenen Aufklärungsbilder für

archäologische Fragestellungen nutzen lassen, auch wenn keine dazugehörigen Flug- und Kalibrierdaten mehr erhalten bzw. auffindbar sind.

Die Eignung und Bedeutung von CORONA-Satellitenbildern für die Landschaftsarchäologie konnte NIKOLAOS GALIATSATOS bereits in seiner Dissertation aufzeigen. In seinem hier veröffentlichten Beitrag befasst er sich ergänzend mit den Auswirkungen der nunmehr nur noch digitalen Auslieferungen der deklassifizierten CORONA-Aufnahmen.

Der besondere Dank der Veranstalter gilt der Redaktion der PFG, die ein zeitnahes Erscheinen dieser aktuellen Resultate ermög-

lichte. Dank gilt auch allen Autoren und den Gutachtern, die dafür gesorgt haben, dass die Artikel rechtzeitig zum Redaktionsschluss vorlagen.

Eine zweite Konferenz mit ähnlichen Schwerpunkten wie 2008 wird im September 2009 wieder in Bern stattfinden (Info: maps.unibe.ch).

Dr. (USA) DIRK RIEKE-ZAPP, RALPH ROSENBAUER, M.A., lic. phil. SUSANNE RUTHISHAUSER, DI Dr. ALEXANDER REITERER, e-mail: zapp@geo.unibe.ch, ralph.rosenbauer@arch.unibe.ch, susanne.rutishauser@arch.unibe.ch, alexander.reiterer@tuwien.ac.at.

# Manuscript Maps as Sources for Cultural History and the History of Climatology

THOMAS HORST, München

**Keywords:** Manuscript Maps, Forensic Cartography, Cultural History, History of Climatology, Glacier Maps

**Summary:** This article, which is part of my doctoral thesis, deals with selected manuscript maps (particularly forensic maps), which can serve among other things as excellent sources for cultural history because they document former vegetation like the erstwhile viticulture in the dukedom of Bavaria or the early-recent glacier advances in the Eastern Alps. Therefore, it intends to contribute to interdisciplinary science in the history of climatology.

**Zusammenfassung:** *Manuskriptkarten als Quellen für die Kultur- und Klimageschichte.* Dieser Artikel, der Teil meiner Doktorarbeit ist, behandelt ausgewählte Manuskriptkarten (vor allem Forensische Karten), die unter anderem ausgezeichnete Quellen für die Kulturgeschichte darstellen, weil sie ehemalige Landschaftszustände wie einstigen Weinanbau im Herzogtum Bayern oder frührezente Gletschervorstöße in den Ostalpen dokumentieren. Somit wird beabsichtigt, einen Beitrag zur interdisziplinären Klimageschichte zu leisten.

---

## 1 Introduction

In the history of cartography we can see a domination of studies of printed maps, whereas manuscript maps, which are nowadays mostly stored in archives, are usually not taken into consideration. This is amazing because old maps (like city maps, cf. HORST 2006) and former pictures can serve as excellent sources for interdisciplinary studies like cultural history as well as the history of climatology.

## 2 Classification of Manuscript Maps

Manuscript maps can be classified in multiple ways (HORST 2009): On the one hand, they can be ordered according to their authors (if they are known), which produced the unique cartographic picture with special methods. On the other hand, these maps (HARVEY 1980 and 1987) can be divided, according to their contents, into “*legal/litigation maps*”, which were drawn for the court, and “*regional maps*”,

which were designed by special painters at the order of educated sovereigns in the time of the humanism. Besides, these “*regional maps*” often were printed as early as from the 16<sup>th</sup> century onwards and serve as self-portrayal of the independent duchies in the Holy Roman Empire as well as for the administration (BRUNNER 2006, STAMS 1990).

## 3 Forensic Cartography

But let us look more closely at the so-called “*forensic cartography*” (HORST 2008): These “*legal maps*” are always part of court-files and can be sketchy or colored pictorial maps mostly showing illustrations regarding a court dispute. In order to prepare the people involved, the region in question was inspected closely and mapped by sworn artists. Therefore these highly specialised maps show small areas and are very close to the reality of the past.

As products of “*forensic cartography*”, these maps initiate a major shift in the cartography of the 16<sup>th</sup> century, when these maps started to

boom. With the institution of the so-called “Reichskammergericht” [Supreme Court] in 1495 it became a tradition in the state of the early modern times, which was characterised by an increase in administrative documents, that legal proceedings were assisted by an inspection of the border (NEUMANN 2002, VOLLET 1991).

However, the beginning of these picture-maps, also called “*Augenscheinkarten*” or “*Tyberiate*” (HELLWIG 1992), was much earlier: Predecessors were found in Italy, England (HARVEY 1980 and 1993), France as well as Burgundy (DAINVILLE 1970), and the Netherlands already in the 14<sup>th</sup> and 15<sup>th</sup> centuries (GAUTIER-DALCHE 1996). Therefore, it is worthwhile analyzing, with the required historical meticulousness, these important documents, which show the first steps towards our contemporary cartography. Of great importance to this is the interdisciplinary collaboration between cartographers and historians, who can read the corresponding files (especially in the case of paleographic questions).

#### 4 Manuscript Maps as Sources for the Cultural History

As an example, we can survey the realistic manuscript map of a legal inspection in the farmland between Oberbergen and Schwabhausen (near Landsberg am Lech) in the former dukedom of Bavaria (HORST 2008; cf.

Fig. 1). This south oriented gouache painting, dated December 5<sup>th</sup> 1562, shows three situations in winter scenery: On the right side we can see a corn dealer with his two sons and two traps. The group walks through the snow to the left side of the map, where the observer can see the father bidding farewell to his sons who continue without him to the farmer’s market in Landsberg am Lech (cf. the legend: “*hinther diesem perg ligt Landsperg*” [behind this hill is Landsberg]). It is unknown why the father, who can be seen in a third scene, goes another way back. Probably he wanted to take a faster shortcut. In any case, we can see him again with his footsteps in the snow. But his tracks end at a new well (legend: “*Prunnen*” [well]), which was burrowed by the farming community of Oberbergen. The poor man has fallen into this well, which he certainly was not able to see because of the snow, and is now dead.

On other “legal maps” of the time, we can see more details such as the whole committee of a legal inspection in a village with realistic-looking houses (cf. the manuscript map of Prühl near Würzburg in Franconia of 1581, cf. LEIDEL & FRANZ 2006) as well as an agrarian festival, a church procession, farmers working in the field or in the woods, juridical elements like gallows and even a witch dance (cf. the details of the parade map of Graisbach near Donauwörth of 1570; HORST 2009). Other maps also illustrate exactly the architecture of former days with red tiled roofs and thatched



**Fig. 1:** Delineation of an accident near Landsberg am Lech in several scenes, 1562 (Bavarian Central State Archive, Munich, Pls. 20607).



**Fig. 2:** Manuscript Map of Neumarkt in Upper Palatinate, around 1510 (State Archive, Amberg).

roofs. This can be seen in the manuscript map of Neumarkt in Upper Palatinate, which shows the city around 1510 after the Bavarian war of succession with its damaged city walls as well with new buildings (cf. Fig. 2 with the uncovered house in the left side and a tower crane). These genuine maps can serve as snapshots of the past before the time of photography, because they show many details of the history of arts, justice, economy and anthropology.

## 5 Documentation of the Former Cultivated Landscape: Viticulture

Furthermore, these maps document the cultivated landscape of the past and demonstrate erstwhile viticulture in Bavaria, which is proven also through written archival files (HÄUSSLER 2008). Not until a number of years ago it was realised that manuscript maps also show cartographic vine-symbols as well as explanatory legends (BRUNNER 2007).

As an example may serve a manuscript map of the valley of the Fils River (Baden-Württemberg) of 1534/1535, where we see a big vineyard in the middle of the map in a region, where winegrowing existed until the beginning of the 17<sup>th</sup> century. Moreover, this map was carved into two parts, so that one part of it nowadays is in the Main State Archive of Stuttgart, whereas the other lies in the city archive of Ulm.

Another map is the drawing by the Bavarian Philipp Apian (1531–1589), who also produced views of castles besides his official function as cartographer of the dukedom (DIEPOLDER 1989). Here we can see among other things the castle of Gumpenberg (near Neuburg an der Donau) around the middle of the 16<sup>th</sup> century and precisely named vineyards. From 1554 to 1563 this universal genius, who also was a mathematician, an astronomer and a medical scientist, mapped the dukedom of Bavaria at the order of its duke Albrecht V. (1528–1579). The result of this first topographic survey of the dukedom was a master drawing of 40 square meters with a measuring unit of about 1:45 000 (WOLFF 1988). From this original drawing, which is now lost, the cartographer duplicated the so-called “*Bairischen Landtafeln*” in 24 sheets with a major measuring unit of about 1:140 000, which was repro-



**Fig. 3:** “Bairische Landtafeln”, woodcarving from 1568 by Philipp Apian. Detail of plate 9: vineyards near Neuburg an der Donau.



duced as woodcarving for the first time in 1568 (GASSER 1904, WOLFF et al. 1989). This eminent opus explicitly documents viticulture on seven sheets at the Danube river in Neuburg an der Donau (“*Bairischen Landtaflen*”, plate 9, cf. Fig. 3), Kelheim (plate 10), Regensburg (plate 6), Pfaffenmünster and at the Bogenberg hill (plate 11), as well as viticulture near Pöttmes (plate 13), at the Isar river southerly of Landshut (plate 14) and last but not least also southerly of Rott am Inn (plate 18). This is very important because here we can retrace the winegrowing in the former dukedom of Bavaria, where the steel slope viticulture boomed throughout the Danube River until the Thirty Years’ War. The background of its decline in Bavaria is closely connected to different factors. Among these especially the climatic change during the Little Ice Age has to be emphasised (BRUNNER 2007).

## 6 Manuscript Maps as Sources for the History of Climatology

Apart from drawing a cartographic picture of former viticulture, manuscript maps also allow us to trace the catastrophic advancement

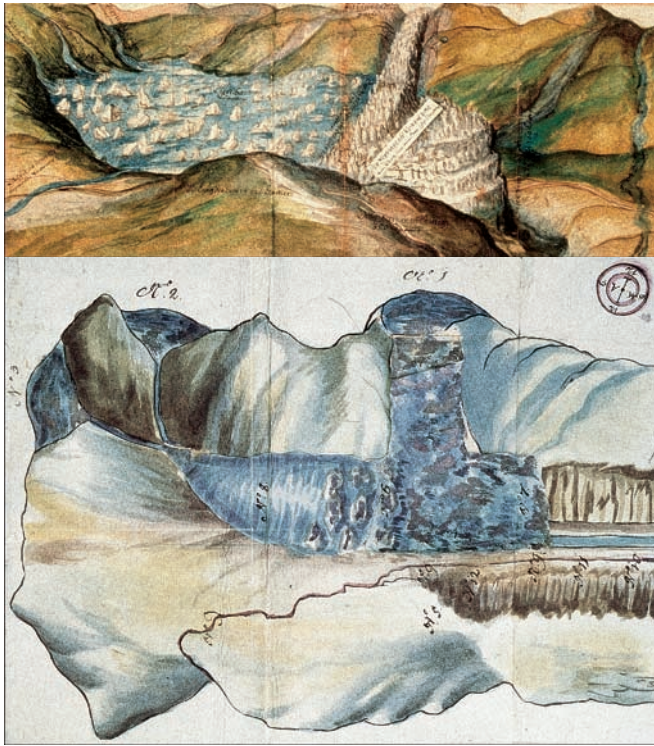
of glacier ice in the central and eastern Alps (KINZL 1958, WINKLER 2002). Thus, in addition to written documents, biological data and physical data, these maps serve as “*anthropogenic proxydata*” for the history of climatology, which until today has been noticed only marginally by this interdisciplinary science (BEHRINGER et al. 2005, BEHRINGER 2008, GLASER 2008 and PFISTER 1999).

The climatic change can be followed on pictures and maps from the “*Little Ice Age*” (from 1600 onwards) throughout the time of the European Enlightenment. As an example serve winter landscape-pictures like the water colours by Court Palatine Friedrich Casimir of Ortenburg (1591–1658), which were painted around 1625. It shows everyday life in Lower Bavaria throughout the seasons (ALTSCHÄFL 2000, BLEIBRUNNER 1982).

On the other hand, we can follow the advancement of glacier ice in the manuscript maps of the “*Zillertal*” valley by Hilarius Duvivier († 1643), a Parisian painter in the dukedom of Tyrol, which are preserved in the Austrian National Library, in the Bavarian Central State Archive and in the Tyrolean State Archive. His oil-paintings on canvas from around 1630 entitled „*Aigentliche Grundlegung der*



**Fig. 4:** Manuscript Map of the Zillertal from around 1630 (Austrian National Library, Vienna, Map Library, K III 98.594).



**Figs. 5 and 6:** Early-recent glacier advances of the “Vernagtferner” in Manuscript Maps from 1601 and 1681 (Tyrolean State Museum Ferdinandeum, Innsbruck, Fb 3631).

*Fürstl. Salzburgischen Herrschaft Kropfberg im Zillertal nach Compaß vnd Stunde*“ show the domain of the archbishopric of Salzburg with the Inn River on its right side (cf. Fig. 4). Behind that scene, the snow-covered crests of the alpine main ridge are illustrated in a naturalistic way as painted icebergs (KINZL 1955).

Another example is the representation of early-recent glacier advances in the eastern Alps like the Oetz valley, especially of the glacier “Vernagtferner”, which is depicted in three manuscript maps throughout the 17<sup>th</sup> century (GROVE 1988, NICOLUSSI 1990; cf. Figs. 5 and 6). At this point, regional maps of the dukedom of Tyrol (BRUNNER 2005) as well as new-found manuscript-maps can give more details (BRUNNER & HORST 2007).

Finally, the discovery of photography (FABER 2008) led to the first terrestrial surveys with an early photogrammetric technique, the plane-table photogrammetry (intersection photogrammetry), when Sebastian Finster-

walder (1862–1951) made his first glacier photographs of the “Vernagtferner” in 1886 (BRUNNER 2000 and 2004; cf. Fig. 7).



**Fig. 7:** Glacier photography in the region of the “Vernagtferner” by Sebastian Finsterwalder in 1886.

## References

- ALTSCHÄFL, C., 2000: Orte und Landschaften des Grafen Casimir von Ortenburg. – Bad Birnbacher Heimatheft **10**: 158–174.
- BEHRINGER, W., LEHMANN, H. & PFISTER, C. (Hrsg.), 2005: Kulturelle Konsequenzen der „Kleinen Eiszeit“. – 1. Ed. (Veröffentlichungen des Max-Planck-Instituts für Geschichte **212**), Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen.
- BEHRINGER, W., 2008: Kulturgeschichte des Klimas von der Eiszeit zur globalen Erwärmung. – 3. Ed., Beck, München.
- BLEIBRUNNER, H., 1982: Niederbayern. Kulturgeschichte des bayerischen Unterlandes in zwei Bänden. – 2. Ed., Bezirkstag von Niederbayern, Landshut.
- BRUNNER, K., 2000: Erste großmaßstäbige Gletscherkarten unter besonderer Berücksichtigung der Hohen Tauern. – Salzburger Geographische Arbeiten **36**: 7–21.
- BRUNNER, K., 2004: Die Karte „Das Karls-Eisfeld“ im Kontext erster exakter Gletscherkarten. – In: Das Karls-Eisfeld. Forschungsarbeiten am Hallstätter Gletscher (Wissenschaftliche Alpenvereinshefte **38**), Haus des Alpinismus, München: 9–30.
- BRUNNER, K., 2005: Karten als Klimazeugen. – Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft **147**: 237–264.
- BRUNNER, K., 2006: Gedruckte Regionalkarten des 16. und 17. Jahrhunderts. – In: Térképtudományi Tanulmányok Klinghammer István professzor 65. születésnapja tiszteletére, (Studia Cartologica **13**), ELTE Térképtudományi és Geoinformatikai Tanszék, Budapest: 71–80.
- BRUNNER, K. & HORST, TH., 2007: Eine Karte des Zugspitzgebiets (18. Jh.) und die Wirrnisse um die Erstbesteigung. – Cartographica Helvetica **35**: 3–7.
- BRUNNER, K., 2007: Klimaentwicklung in alten Karten und Bildern. – In: Natur und Mensch in Mitteleuropa im letzten Jahrtausend (Rundgespräche der Kommission für Ökologie **32**), Pfeil, München: 65–80.
- DAINVILLE, F. DE, 1970: Cartes et contestations au XVe siècle. – Imago Mundi **24**: 99–121.
- DIEPOLDER, G., 1989: Das Werk Philipp Apians als historische Quelle. – In: Philipp Apian und die Kartographie der Renaissance, (Bayerische Staatsbibliothek München, Ausstellungskataloge **50**), Konrad, Weißenhorn: 129–152.
- FABER, M., 2008: Die Weite des Eises. Arktis und Alpen 1860 bis heute. – Cantz, Ostfildern.
- GASSER, M., 1904: Studien zu Philipp Apians Landesaufnahme. – Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft in München, München, 17–68 (Reprint 1973 in: Acta Cartographica **16**: 153–208).
- GAUTIER-DALCHE, P., 1996: Limite, frontière et organisation de l'espace dans la géographie et cartographie de la fin du Moyen Age – In: Grenzen und Raumvorstellungen (11.–20. Jh.), Frontières et conceptions de l'espace (11e–20e siècle), (Clio Lucernensis **3**), Chronos, Zürich: 93–122.
- GLASER, R., 2008: Klimageschichte Mitteleuropas. 1000 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen. – 2. Ed., Primus-Verlag, Darmstadt.
- GROVE, J.M., 1988: The little Ice Age. – 1. Ed., Methuen, London & New York.
- HARVEY, P.D.A., 1980: The History of Topographical Maps: Symbols, Pictures and Surveys. – 1. Ed., Thames and Hudson, London.
- HARVEY, P.D.A., 1987: Local and Regional Cartography in Medieval Europe. – In: The History of Cartography **1**: Cartography in Prehistoric, Ancient and Medieval Europe and the Mediterranean, Chicago & London: 464–501.
- HARVEY, P.D.A., 1993: Maps in Tudor England. – 1. Ed., Univ. of Chicago Press, Chicago.
- HÄUSSLER, TH., 2008: Weinbau in Altbayern. Der Baierwein einst und heute. – 1. Ed., Books on Demand, Norderstedt.
- HELLWIG, F., 1992: Tyberiaide und Augenschein. Zur forensischen Kartographie im 16. Jahrhundert. – In: Europarecht, Energierecht, Wirtschaftsrecht. Festschrift für Bodo Börner zum 70. Geburtstag, Heymann, Köln: 805–834.
- HORST, TH., 2006: Die Entwicklung der Stadtkartographie Münchens von ihren Anfängen bis zum Beginn des 19. Jahrhunderts. – Zeitschrift für Bayerische Landesgeschichte **69** (1): 53–121.
- HORST, TH., 2008: Die Entwicklung der Manuskriptkarten Altbayerns: Eine kartographiehistorische Studie zum Augenscheinplan (Tyberiaide) unter besonderer Berücksichtigung der Kultur- und Klimageschichte. – Cartographica Helvetica **38**: 44–46.
- HORST, TH., 2008: Die Altkarte als Quelle für den Historiker – Die Geschichte der Kartographie als Historische Hilfswissenschaft. – Archiv für Diplomatik, Schriftgeschichte, Siegel- und Wappenkunde **54**: 309–377.
- HORST, TH., 2009: Die Entwicklung der Manuskriptkarten Altbayerns. Eine kartographiehistorische Studie zum Augenscheinplan (Tyberiaide) unter besonderer Berücksichtigung der Kultur- und Klimageschichte. – Schriftenreihe zur Bayerischen Landesgeschichte (in press).
- KINZL, H., 1955: Die Darstellung der Gletscher im Atlas Tyrolensis von Peter Anich und Blasius Hueber (1774). – Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft in Wien **48**: 89–104.



- KINZL, H., 1958: Gletscher als Klimazeugen. – In: 31. Deutscher Geographentag Würzburg 1957, Tagungsberichte und wiss. Abhandlungen, Wiesbaden: 222–231.
- LEIDEL, G. & FRANZ, M.R., 2006: Von der gemalten Landschaft zum vermessenen Land. Ausstellung des Bayerischen Hauptstaatsarchivs zur Geschichte der handgezeichneten Karten in Bayern, München 6. Oktober bis 22. Dezember 2006 – 1. Ed. (Ausstellungskataloge der Staatlichen Archive Bayerns **48**), Generaldirektion der Staatlichen Archive Bayerns, München.
- NEUMANN, J., 2002: Reichskammergericht und Kartographie. Über Entstehung und Benennung der Augenschein-Karten. – 9. Kartographiehistorisches Colloquium Rostock 1998. Vorträge, Berichte, Posterbeiträge, Kirschbaum-Verlag, Bonn: 163–169.
- NICOLUSSI, K., 1990: Bilddokumente zur Geschichte des Vernagtferners im 17. Jahrhundert. – Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie **26**: 97–119.
- PFISTER, C., 1999: Wetternachhersage. 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen. – 1. Ed., Haupt, Bern.
- STAMS, W., 1990: Die Anfänge der neuzeitlichen Kartographie in Mitteleuropa. – In: Kursächsische Kartographie bis zum Dreißigjährigen Krieg 1: Die Anfänge des Kartenwesens (Veröffentlichungen des Staatlichen Mathematisch-Physikalischen Salons **8**), Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin: 37–105.
- VOLLET, H., 1991: Der Augenschein in Prozessen des Reichskammergerichts – Beispiele aus Franken. – 5. Kartographiehistorisches Kolloquium Oldenburg, Reimer, Berlin: 145–163.
- WINKLER, S., 2002: Von der „Kleinen Eiszeit“ zum „globalen Gletscherrückgang“. Eignen sich Gletscher als Klimazeugen? – 1. Ed., Abhandlungen der Mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse 3, Franz Steiner Verlag, Stuttgart.
- WOLFF, H., 1988: Cartographia Bavariae. Bayern im Bild der Karte. – 1. Ed. (Bayerische Staatsbibliothek München, Ausstellungskataloge **44**), Konrad, Weißenhorn in Bayern.
- WOLFF, H. (Hrsg.), 1989: Philipp Apian und die Kartographie der Renaissance. – 1. Ed. (Bayerische Staatsbibliothek München, Ausstellungskataloge **50**), Konrad, Weißenhorn in Bayern.
- Address of the Author:  
 Dr. des. THOMAS HORST, M.A., Universität der Bundeswehr München, Lehrstuhl für Kartographie und Topographie, D-85577 Neubiberg,  
 e-mail: thomashorst@gmx.net
- Manuskript eingereicht: Dezember 2008  
 Angenommen: Februar 2009



# Aufbau historischer 3D-Szenarien am Beispiel der mittelalterlichen Stadt Duisburg

THOMAS JEDRZEJAS & HEINZ-JÜRGEN PRZYBILLA, Bochum

**Keywords:** 3D-Stadtmodelle, Visualisierung, Google Earth, terrestrisches Laserscanning, historische Karten, Archäologie

**Summary:** *Generating Historical Urban 3D-Scenarios for Use in Google Earth Representing the Medieval City of Duisburg.* The presentation of 3D city models within earth browsers, such as Google Earth, is becoming more and more popular due to the realistic view of the scenes. In addition to the presentation of actual sceneries, historical situations can be visualized as well. This paper describes the generation of historical urban 3D-scenarios for use in Google Earth, representing the medieval city of Duisburg in the years 1000, 1200 and 1566. Wooden models on a scale of 1 : 500 exhibited in the *Kultur- und Stadthistorisches Museum Duisburg* had been captured by terrestrial laser scanning with the Z+F IMAGER 5006 system. The point clouds together with ortho-images of the wooden models are used to estimate automatically the geometry of standardised buildings on a large scale. The historical Corputius map as well as archaeological knowledge is used to texture the virtual reconstruction of the models.

**Zusammenfassung:** Anbieter aktueller Earth-Browser werten ihre Modelldaten vermehrt durch 3D-Darstellungen auf. Der Nutzer erhält somit eine deutlich realistischere Ansicht der dargestellten Szenarien. Systeme, wie Google Earth, eignen sich jedoch nicht nur für die Präsentation gegenwärtiger Zustände, vielmehr erlauben sie auch die virtuelle Darstellung historischer Situationen. Der Bericht beschreibt die Erstellung virtueller Modelle der mittelalterlichen Stadt Duisburg für die Jahre 1000, 1200 und 1566. Zu diesem Zweck wurden die im Stadt- und Kulturhistorischen Museum Duisburg ausgestellten drei Holzmodelle durch terrestrisches Laserscanning mit dem System Z+F IMAGER 5006 erfasst. Die Punktwolken bilden die Grundlage für die automatisierte Ableitung der Dachformen, Gebäudehöhen sowie -grundrisse und ermöglichen gemeinsam mit Informationen aus parallel erstellten Orthophotos die Konstruktion der Gebäudeobjekte. Zur archäologisch und graphisch-inhaltlich plausiblen Ausgestaltung der Modelle wird der sogenannte Corputius-Plan genutzt, der einen anschaulichen Eindruck der architektonischen Gestaltung der frühneuzeitlichen Stadt wiedergibt.

---

## 1 Einleitung

2010 wird das Ruhrgebiet Kulturhauptstadt Europas. Aus diesem Anlass haben drei Denkmalbehörden des Ruhrgebietes (Kommunalarchäologien Dortmund, Essen und Duisburg) in Zusammenarbeit mit der Hochschule Bochum ein digitales Visualisierungsprojekt initiiert, das Interessierte über die Webseite „RuhrZeiten.de“ abrufen können ([www.RuhrZeiten.de](http://www.RuhrZeiten.de)). Präsentiert werden ausgewählte Themen zu archäologischen Ausgrabungsstätten entlang des Hellwegs, die die historische

Entwicklung des Ruhrgebietes von der Vorgeschichte über das Mittelalter bis hin zur Gegenwart beschreiben.

Als Darstellungsmedium wird der kostenlose Earth-Browser Google Earth (Google 2008a) genutzt. Mit diesem können raumbezogene 3D-Darstellungen von historischen Modellen präsentiert und deren geschichtlicher Hintergrund erläutert werden. Ein zu visualisierender Themenbereich ist dabei die Entwicklung der mittelalterlichen Stadt Duisburg der Epochen 1000, 1200 und 1566, von einer aufblühenden mittelalterlichen Kauf-



**Abb. 1:** Plan des Johannes Corputius aus dem Jahr 1566 (links), Detail (rechts).

mannsstadt bis hin zum Wandel zur Ackerbürgerstadt im ausgehenden Mittelalter (JEDRZEJAS 2008).

Im Jahre 1566 veröffentlichte Johannes Corputius seinen Stadtplan über die Darstellung Duisburgs aus der Vogelperspektive (siehe Abb. 1). Corputius' Arbeiten an diesem Plan erfolgten in den vorangehenden vier Jahren nach exakten Messungen im Duisburger Stadtgebiet. In dieser Zeit war er Schüler des Geographen und Universalgelehrten Gerhard Mercator. Der „Corputius-Plan“ besticht durch hohe Genauigkeit und besondere Detailtreue. Der Grundriss deckt sich fast mit dem neuzeitlichen Urkataster (MILZ & VON RODEN 1993).

## 2 Datenerfassung

Holzmodelle aus den Jahren 1000, 1200 und 1566 im Maßstab 1 : 500 (siehe Abb. 2), die die städtische Entwicklung im Mittelalter dokumentieren, sind im Kultur- und Stadthistori-

schen Museum Duisburg ausgestellt. Mit einer Ausdehnung von jeweils 2 m × 1,3 m bilden sie die Grundlage für die Erfassung mit terrestrischem Laserscanning und Photogrammetrie.

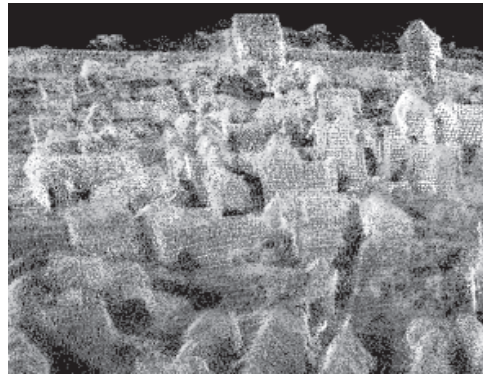
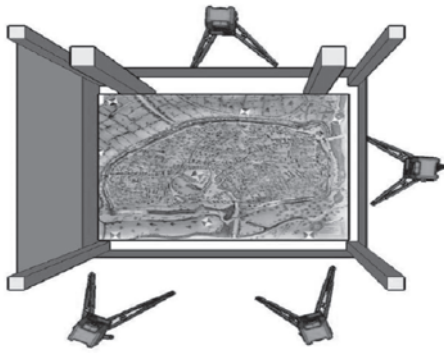
### 2.1 Terrestrisches Laserscanning

Terrestrische Laserscanner, wie zum Beispiel das System IMAGER 5006 der Fa. Zoller+Fröhlich, werden vermehrt für die 3D-Dokumentation von Realwelt-Objekten eingesetzt. Ihre Eignung für die Messung von großmaßstäbigen Modellen ist bisher nicht hinreichend erprobt. Insofern stellte die Erfassung der Duisburger Holz-Stadtmodelle eine interessante Herausforderung dar.

Das Lasermesssystem IMAGER 5006 ermöglicht die Durchführung von Scans in unterschiedlichen Auflösungsstufen. In der Auflösungsstufe „super high“ beträgt die horizontale und vertikale Schrittweite des Laserscanners 0,018° (Z+F 2008). Bei Aufnahmeentfer-



**Abb. 2:** Holzmodell Duisburg aus dem Jahr 1566 im Maßstab 1 : 500 (links), Detail (rechts).



**Abb. 3:** Aufnahmekonfiguration im Grundriss (links) und Ausschnitt aus der Punktwolke (rechts).

nungen von 1–3 m liegen die Punktabstände zwischen 0,3 und 0,9 mm; die Punktdichte variiert zwischen 1100–120 Punkten/cm<sup>2</sup>. Die im Rahmen einer räumlichen Blockausgleichung verknüpfte Gesamtpunktwolke (Restabweichungen an den Verknüpfungspunkten  $\leq 1$  mm) weist eine durchschnittliche Punktdichte von circa 900 Punkten/cm<sup>2</sup> auf. Abb. 3 zeigt die Aufnahmekonfiguration sowie einen Ausschnitt der verknüpften Punktwolke. Auf Grund des, im Vergleich zum Vorgängermodell (IMAGER 5003), deutlich verringerten Signal-Rausch Verhältnisses der Messdaten, liefert das Scanning eine homogene Punktwolke für die nachfolgende Datenweiterverarbeitung.



**Abb. 4:** Kameraaufhängung für die „Befliegung“ der Holzmodelle.

## 2.2 Photogrammetrische Aufnahme

Die Georeferenzierung der historischen 3D-Stadtmodelle in Google Earth wird über Orthophotos der jeweiligen Holzmodelle durchgeführt, die zu diesem Zweck auf aktuell vorhandene Objekte (zum Beispiel die Stadtmauer) manuell eingepaßt werden. Zur Beschaffung des Bildmaterials wurde eine digitale Kamera (Nikon D2Xs, Sensorgröße 4288 \* 2848 Pixel) in einer speziell dafür gebauten Vorrichtung eingesetzt (siehe Abb. 4). Diese ermöglichte, die in einem Paternoster-Schrank installierten Modelle, in jeweils drei Streifen à fünf Aufnahmen vollständig zu erfassen. Die gesamte örtliche Datenaufnahme dauerte fünf Stunden.

Das digitale Höhenmodell des nahezu ebenen, aber nahezu gleichmäßig geneigten „Holzmodell-Geländes“ (Rasterweite 40 mm) sowie das zugehörige Orthophoto (Auflösung im Modell: 0,25 mm) wurden mit der Software SOCET SET 5.4.1 von BAE Systems (BAE 2008) erstellt. Neben der Nutzung für die Georeferenzierung diente es zusätzlich der Herleitung von Gebäudegrundrissen (siehe Abschnitt 3).

## 3 Ermittlung der geometrischen Grundlagendaten

Die historischen Stadtmodelle Duisburg bestehen im Wesentlichen aus einer großen Anzahl von Gebäudeobjekten. Eine vollständige manuelle Modellierung dieser Gebäude ist



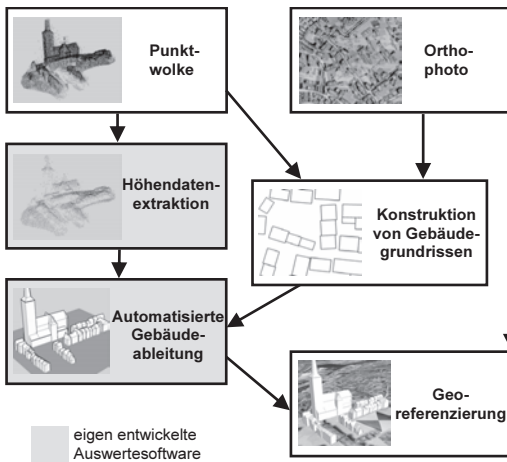


Abb. 5: Elemente des Auswerteprozesses.

aufgrund des hohen Zeit- und Arbeitsaufwands unzweckmäßig. Das 1566er Stadtmodell, mit der größten Anzahl an Objekten, beinhaltet ca. 800 Gebäude. Daher wurde eine Lösung mit einem möglichst hohen Automatisierungsgrad bei der Auswertung der terrestrischen Laserscannerdaten angestrebt. Die dargestellte, relativ einfache Vorgehensweise ist bewusst der vorliegenden Anwendung angepasst. Sie stellt somit keinen konkurrierenden Ansatz für etablierte Verfahren zur automatisierten Generierung von 3D-Stadtmodellen dar (HAALA et al. 1998, BÖHM & HAALA 2005, SCHWALBE et al. 2005).

Der auf terrestrischem Laserscanning und Photogrammetrie (Orthophoto) basierende Auswerteprozess ist in seinen wesentlichen Komponenten in Abb. 5 dargestellt. Neben Standard-Softwareprodukten (Leica Cyclone, Bentley Microstation) bilden zwei speziell für die Problemstellung entwickelte Programme zur Höhendatenextraktion und automatisierten Objekt ableitung die zentralen Elemente des Bearbeitungsprozesses.

### 3.1 Extraktion der Höhendaten

In diesem Bearbeitungsschritt werden aus den Punktwolken nur die Höhenwerte von Punkten übernommen, die, bezogen auf ein vorgegebenes Raster, einen maximalen Z-Wert besitzen. Somit wird die Punktwolke in einem

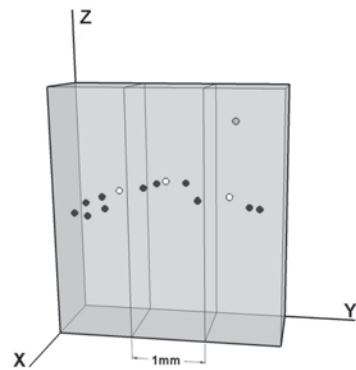


Abb. 6: Rasteranalyse: Z-Werte der extrahierten Punkte (weiss) und eliminierter Ausreißer (grau).

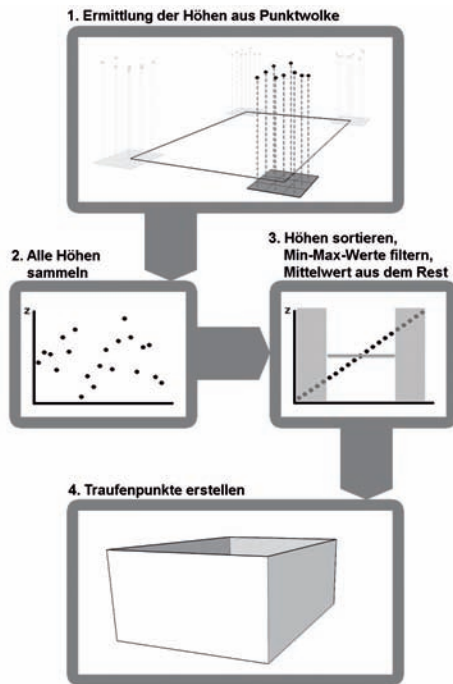
Maße gefiltert, dass nur die für die Ableitung von Objekthöhen brauchbaren Punkte vorhanden sind.

Es werden hierzu die Höhenwerte aller Punkte verglichen, die sich in einem definierten Raster (1 mm groß mit durchschnittlich 10 Punkten) befinden, mit dem Ziel, den höchsten Z-Wert zu übernehmen. Um Ausreißer aus der Eingangspunktwolke zu filtern, wird zusätzlich die zweitgrößte Höheninformation gespeichert und mit der höchsten verglichen. Überschreitet die Differenz der beiden gespeicherten Werte einen definierten Grenzwert (1 mm), wird der Wert der zweitgrößten Höhe übernommen (siehe Abb. 6). Als X- und Y-Koordinaten werden die Koordinaten des Rastermittelpunktes gespeichert. Die gefilterte Punktwolkendatei enthält nur noch circa 20% der Punkte der Eingabedatei.

Die gefilterte Punktwolkendatei, in Verbindung mit den Daten der Gebäudegrundrisse (Grundrissvektoren aus geeigneten Horizontalschnitten durch die Punktwolke und aus dem Orthophoto abgeleitet, siehe Abb. 5 sowie Abschnitt 3.2), wird zur automatisierten Ableitung der Gebäudehöhen und der Erstellung der Objekte eingesetzt.

### 3.2 Automatisierte Objekt ableitung

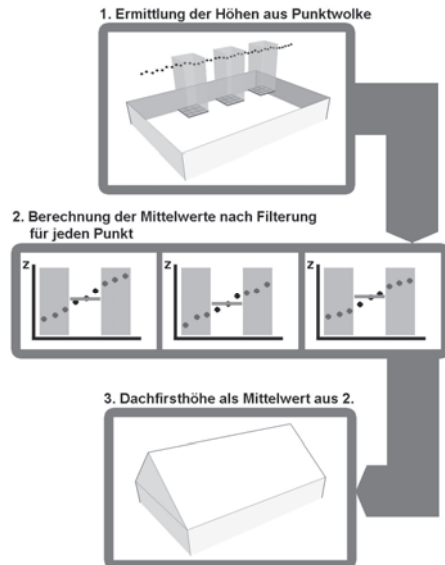
Auf Basis der Grundrisskoordinaten der Gebäudeecken und der gefilterten Punktwolke



**Abb. 7:** Ermittlung der Traufenhöhen.

(siehe Abschnitt 3.1) wird die Traufenhöhe der Gebäude ermittelt. Dazu werden an jeder Gebäudeecke Höhenwerte, die sich in einem definierten Raster ( $1 \text{ mm}^2$ ) um die Grundriss-Koordinaten dieser Ecke befinden, aus der extrahierten Punktwolke ausgewählt und gespeichert. Aus den gesammelten Höhen aller Eckpunkte des Gebäudes werden im Anschluss die niedrigsten und höchsten Werte entfernt und aus den verbleibenden der Mittelwert berechnet (siehe Abb. 7). Dieser dient als Traufenhöhe des Gebäudes. Die X- und Y-Koordinaten des Traufenpunktes werden aus den Eckpunktkoordinaten übernommen. Durch dieses Verfahren wird vermieden, dass Punkte, die entweder gar nicht oder nur schlecht die Traufenhöhe eines Gebäudes beschreiben, zu deren Berechnung genutzt werden.

Die überwiegende Anzahl der Gebäude in den Holzmodellen besitzt eine rechteckige Form, verbunden mit einem Satteldach. Die Ermittlung der Dachfirsthöhe geschieht nach einem ähnlichen Prinzip wie bei der Ableitung der Traufenhöhe. Dabei wird vorausgesetzt, dass sich bei Satteldächern die geneig-



**Abb. 8:** Ermittlung der Dachfirsthöhen.

ten Dachflächen parallel zu den beiden längeren Seiten eines Gebäuderechteckes befinden und die Dachfirstlinie in der Mitte des rechtwinkligen Gebäudes verläuft.

Der Algorithmus sucht nun – ausgehend von den Grundrisskoordinaten der Dachfirstlinie – nach zugehörigen Höhen in der Punktwolke. Wie bei der Ableitung der Traufenhöhe wird zu jedem Grundriss-Punkt eine Anzahl von Höhen in einem definierten Raster ( $1 \text{ mm}^2$ ) ausgewählt und gespeichert. Minimal- und Maximalwert der Z-Koordinaten eines Punktes werden in einem ersten Rechenschritt eliminiert. Aus den restlichen Höhen wird nachfolgend für jeden Grundriss-Punkt der Mittelwert berechnet, um anschließend aus diesen Werten die mittlere Dachfirsthöhe abzuleiten (siehe Abb. 8). Mit diesem Verfahren kann eine hinreichende Genauigkeit zur Ableitung der Dachfirsthöhe erreicht werden, ohne dass diese, zum Beispiel durch vorhandene Dachaufbauten, verfälscht wird.

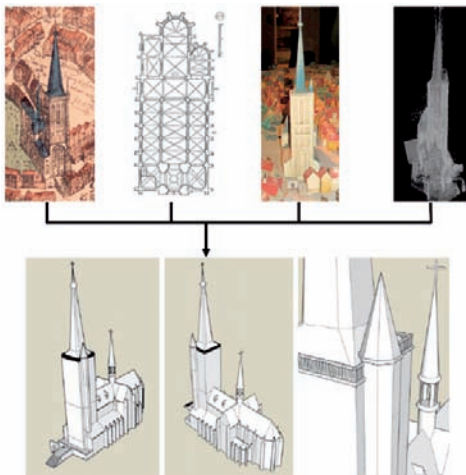
Das vorgestellte Verfahren zur Generierung von Gebäuden aus terrestrischen Laserscannerdaten ermöglicht eine einfachere und

schnellere Auswertung, als dies mit manueller Auswertung möglich wäre. Eine manuelle Modellierung, zum Beispiel mit der Standard-Software für terrestrische Laserscannerdaten, ist aufgrund der geringen Objektgrößen und der zum Teil dicht nebeneinander befindlichen Objekte nur eingeschränkt möglich.

Der zeitliche Aufwand, um einen Teilbereich von circa 50 Objekten komplett zu erstellen, betrug circa 1,5 Stunden. Den größten Anteil beanspruchte dabei die Ableitung der Grundrisskoordinaten aus Horizontalprofilen durch die Punktwolke und aus dem zugehörigen Orthophoto, die manuell im CAD-System Microstation erfolgte. Mit dem beschriebenen Verfahren wurden circa 75% der Gebäude mit Satteldach automatisiert erstellt und im Anschluss über einen DXF-Transfer zur Weiterverarbeitung an das System Google SketchUp übergeben.

### 3.3 Manuelle 3D-Modellierung

In den Holzmodellen enthaltene Objekte mit einer besonderen Struktur, wie zum Beispiel Kirchen mit ihren Türmen, Stadttore oder die Stadtmauer, wurden manuell erstellt. Neben den Informationen des Corputius-Plans und gegebenenfalls vorhandenen Bauplänen wurde hierzu die Punktwolke genutzt (siehe



**Abb. 9:** Basisinformationen und mittels Google SketchUp modelliertes Objekt.

Abb. 9). Oberste Prämisse für die Modellierung war dabei, ein „in sich stimmiges“ Abbild existierender beziehungsweise auch nicht mehr vorhandener Gebäude zu erzeugen, jedoch nicht der Anspruch einer geometrisch exakten Baudokumentation.

Da die Publikation der mittelalterlichen 3D-Modelle auf der Google Earth-Plattform erfolgt, bietet sich eine grafische Abbildung der Modelle über das Format KML (Keyhole Markup Language) an, das den Datenstandard des Browsers repräsentiert. KML entspricht dem XML-Schema und ist ein Standard des Open Geospatial Consortium. Aktuell liegt die Version KML 2.2 vor (OGC 2008).

Google stellt für 3D-Konstruktionen das (in der Grundversion) kostenlose Programm SketchUp zur Verfügung (Google 2008b). Die Bedienung und Funktionen von SketchUp sind schnell und einfach erlernbar. Es ist mit besonderen Funktionen ausgestattet, wie zum Beispiel der Extrusionsmöglichkeit von Flächen. Die Konstruktion von Modellen unterstützt SketchUp weiterhin, indem angegeben wird, welcher Konstruktionsschritt als nächster möglich ist (*inference engine*). Die Software informiert den Anwender darüber zum Beispiel mit Farbmarkierungen oder Tooltips und vereinfacht und beschleunigt somit den Konstruktionsvorgang (POMASKA 2007).

## 4 Georeferenzierung

Die Georeferenzierung von Stadtmodellen in Google Earth ist generell mit verschiedenen Problemen behaftet, deren augenfälligstes auf die Qualität des vorhandenen Geländemodells zurück zu führen ist. Die Daten des digitalen Geländemodells stammen aus der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) der NASA, mit der erstmals ein einheitliches, hochauflösendes DGM für weite Bereiche der Erdoberfläche erstellt wurde. Die Rasterweite beträgt circa 30 m bei einer absoluten Genauigkeit von  $\pm 16$  m (relative Genauigkeit  $\pm 6$  m).

Google Earth reduziert die Rasterweite auf ca. 60 Meter, um das Datenvolumen möglichst gering zu halten (KOPPEL 2007). Dies führt bei umfangreicheren 3D-Szenen dazu, dass die Objekte oftmals über der Geländeoberfläche schweben oder teilweise im Gelände versin-





**Abb. 10:** Lokales DGM mit Randanpassung.

ken. Dieser wenig akzeptable Zustand kann letztlich nur über die Bereitstellung eines qualitativ hochwertigeren, lokalen DGM korrigiert werden. Da das Google Earth-DGM nicht verändert werden kann, beziehungsweise ein Durchdringen der Oberfläche nicht möglich ist, muss das lokale DGM, bei geeigneter Randanpassung, über der vorhandenen Geländeoberfläche platziert werden (siehe Abb. 10). Der Nachteil bei der Verwendung eines eigenen Geländemodells ist jedoch, dass 3D-Objekte in Google Earth kein Kollisionsmodell besitzen, das heißt, es lässt sich durch die Modelle hindurch navigieren. Anwender können somit auch unter das eigene Geländemodell gelangen.

## 5 Ausgestaltung und Publikation

Die in Abb. 9 dargestellte Salvatorkirche ist das einzige der in den drei Holzmodellen vorhandenen Gebäude, das heute noch erhalten ist. Abweichungen von der Darstellung der Kirche im Corputius-Plan gegenüber dem

heutigen Zustand finden sich hauptsächlich im Aufbau des Turmes, der während der Jahrhunderte verschiedenen Zerstörungen ausgesetzt war und neue Baustufen durchlief. Der Corputius-Plan liefert somit die wesentlichen Grundlagen für die Ausgestaltung der historischen Stadtmodelle. Wegen des hohen Detaillierungsgrades ist eine archäologisch plausible Rekonstruktion von Gebäudefassaden ebenso möglich wie ihre Ausstattung mit Farb- und Mustertexturen. Auch Vegetationselemente (Baum- und Straucharten, Weinreben) können auf der Grundlage des Corputius-Plans in das Modell implementiert werden (siehe Abb. 1).

Darüber hinaus ist archäologisches Wissen unabdingbar für eine realitätsnahe Objektrekonstruktion, so dass Archivinformationen sowie Grabungsergebnisse im Bereich der Duisburger Altstadt ebenfalls in die Ausgestaltung einfließen. Detailmodelle von Schiffen im Hafen, Marktständen, Brunnen sowie vom städtischen Pranger ergänzen den Gebäudebestand. Über Placemarks, mit hierfür gesondert erstellten Icons zu definierten Objektarten, werden zudem textliche und bildhafte Zusatzinformationen zu ausgewählten Objekten eingebunden. Diese können über einen eigenen Darstellungs-Layer wahlweise in die 3D-Szene eingeblenndet werden.

Die Publikation der aktuell und zukünftig erstellten 3D-Modelle erfolgt über die Website [www.RuhrZeiten.de](http://www.RuhrZeiten.de). Durch den Aufruf einer Start-KML-Datei wird der nachfolgende Aufbau des jeweiligen Modells im Google Earth Browser initiiert. Dieser erfolgt sukzessive, entsprechend der vorab durchgeführten Strukturierung des Stadtmodells (siehe Abb. 11). Das zu streamende Datenvolumen, im gepackten KMZ-Format, beträgt für Duisburg 1566



**Abb. 11:** Übersicht (links) und Detail (rechts) der mittelalterlichen Stadt Duisburg im Jahr 1566.

circa 20 MByte. Voraussetzung für den Download eines derartigen Datenvolumens ist ein Breitband-Internetzugang.

## 6 Fazit

Mit dem Earthbrowser Google Earth steht ein leistungsfähiges Werkzeug zur Präsentation von virtuellen Stadtmodellen zur Verfügung. Die Plattform bietet jedoch nicht nur Darstellungsmöglichkeiten für aktuell existierende 3D-Szenen, sondern ermöglicht auch die Visualisierung historischer Ensembles.

Die geometrische Erfassung der vorliegenden Holzmodelle auf Basis von terrestrischem Laserscanning und Photogrammetrie hat sich grundsätzlich bewährt. Die Qualität der erfassten Punktwolke bietet in weiten Bereichen eine hinreichend gute Grundlage für Automatisierungsprozesse bei der Ableitung der Gebäudekörper. Allerdings ist der Anspruch an die geometrische Qualität der Rekonstruktion nicht mit realen Stadtmodellen vergleichbar, da auch generalisierte Geometrien, mit geeigneten Texturen versehen, dem Anspruch an eine gute Visualisierung genügen. Der vorliegende Grad der Automatisierung hat den Auswerteprozess – gegenüber einer manuellen Auswertung – deutlich beschleunigt und könnte durch die Definition zusätzlicher Gebäudeprimitive (insbesondere speziell ausgebildeter Dachformen) erweitert werden.

Zur besseren visuellen Interpretation der Punktwolke (insbesondere bei der Generierung der Gebäudegrundrisse) wäre im vorliegenden Fall das Vorhandensein von Farbinformation hilfreich gewesen, eine Option die der Scannerhersteller zwischenzeitlich in das System implementiert hat.

Mit dem System SketchUp stellt Google eine effiziente Software mit hohem Automatisierungspotential zur Verfügung. SketchUp bietet eine Vielzahl von Funktionen zur 3D-Objektkonstruktion und -ausgestaltung, wobei insbesondere das Wissen der angeschlossenen „SketchUp-community“ in vielen Fällen hilfreiche Beiträge und Empfehlungen gibt.

Die Bearbeitung historischer Modelle setzt eine intensive Zusammenarbeit mit Archäologen und Historikern voraus, um die zu erstel-

lenden 3D-Modelle nicht nur unter geometrischen, sondern auch unter inhaltlichen Gesichtspunkten möglichst exakt zu realisieren. Historische Karten und Pläne, Bildmaterial und textliche Informationen bilden dabei, neben modernen Methoden der Informationsverarbeitung, die wesentlichen Grundlagen.

## Literatur

- BAE, 2008: *SOCET SET v5.4.1.* – [www.socetgxp.com/content\\_products/socetset/index.htm](http://www.socetgxp.com/content_products/socetset/index.htm) (15.12.2008).
- BÖHM, J. & HAALA, N., 2005: Efficient Integration of Aerial and Terrestrial Laser Data for Virtual City Modeling Using Lasermaps. – *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **36** (3/W19): 192–197.
- Google, 2008a: *Homepage Google Earth.* – [earth.google.de](http://earth.google.de) (15.12.2008).
- Google, 2008b: *Homepage Google SketchUp.* – [sketchup.google.com/intl/de/](http://sketchup.google.com/intl/de/) (15.12.2008).
- HAALA, N., BRENNER, C. & ANDERS, K.-H., 1998: 3D Urban GIS from Laser Altimeter and 2D Map Data. – *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* **32** (3): 339–346.
- JEDRZEJAS, T., 2008: Aufbau historischer städtischer 3D-Szenarien für eine Nutzung unter Google Earth, basierend auf Daten von terrestrischem Laserscanning, Photogrammetrie und Archivinformationen. – Diplomarbeit Hochschule Bochum, Fachbereich Vermessung und Geoinformatik.
- KOPPEL, M., 2007: Vergleichende Untersuchung zum Aufbau, zur Funktionalität und zur Nutzung aktueller Earth-Browser sowie exemplarische Erstellung einer 3D-Szene mit dem Konstruktionsprogramm Google SketchUp. – Diplomarbeit Hochschule Bochum, Fachbereich Vermessung und Geoinformatik.
- MILZ, J. & VON RODEN, G., 1993: Duisburg im Jahre 1566. Der Stadtplan des Johannes Corputius. – *Duisburger Forschungen*, Band **40**, 78 Seiten. Walter Braun Verlag, Duisburg.
- OGC, 2008: *Keyhole Markup Language.* – [www.opengeospatial.org/standards/kml/](http://www.opengeospatial.org/standards/kml/) (15.12.2008).
- POMASKA, G., 2007: *Web-Visualisierung mit Open Source.* – *Wichmann, Heidelberg.*
- SCHWALBE, E., MAAS, H.-G. & SEIDEL, F., 2005: 3D Building Model Generation From Airborne Laser Scanner Data using 2D GIS Data And Orthogonal Point Cloud Projections. – *International Archives of the Photogrammetry, Remote*

Sensing and Spatial Information Sciences **36** (3/W19): 209–214.  
Z+F, 2008: *Technische Daten Imager 5006*. – [www.zf-laser.com/Z+F\\_imager5006\\_D.pdf](http://www.zf-laser.com/Z+F_imager5006_D.pdf)  
(15.12.2008).

Adresse der Autoren:

Dipl.-Ing. THOMAS JĘDRZEJAK & Prof. Dr.-Ing. HEINZ-JÜRGEN PRZYBILLA, Hochschule Bochum, Labor für Photogrammetrie, D-44801 Bochum, Tel.: +49-234-32-10517, Fax: +49-234-32-14735, e-mail: [Thomas.Jedrzejak@hs-bochum.de](mailto:Thomas.Jedrzejak@hs-bochum.de), [Heinz-Juergen.Przybilla@hs-bochum.de](mailto:Heinz-Juergen.Przybilla@hs-bochum.de)

Manuskript eingereicht: Dezember 2008

Angenommen: Februar 2009



# Vom physischen Stadtmodell zum interaktiven 3D-GIS – Anforderungen und Lösungsansätze am Beispiel der historischen Stadt Solothurn

STEPHAN NEBIKER, ANDREAS BARMETTLER & BEAT FISCHER, Muttenz, Schweiz;  
ERICH WEBER, Solothurn, Schweiz

**Keywords:** 3D City Model, 3D Reconstruction, 3D GIS, Historical GIS, Google Earth

**Summary:** *From Historical City Models to Interactive 3D GIS – Requirements and Approaches Using the Example of the City of Solothurn.* This paper focuses on the establishment of historic 3D GIS based on the 3D reconstruction of physical historic city models. The studies are based on a hand-painted historic 3D model of the city of Solothurn in the year 1830. In the paper we investigate and compare the suitability of different 3D measuring techniques for reconstructing the geometry and texture of the original model. We then discuss the additional requirements but also the benefits of consequently using a 3D GIS technology throughout the project. This also applies to the semi-automatic texturing process and to the proposed collocation-based transformation approach for the irregular distortions which are typical for such historic models. An interactive 3D model of Solothurn 1830 illustrates the potential but also the demand for further investigations on the way to a comprehensive historical 3D GIS.

**Zusammenfassung:** Dieser Beitrag untersucht die Möglichkeiten zur effizienten 3D-Rekonstruktion historischer städtischer Szenarien und zum Aufbau eines historischen 3D-GIS auf der Basis physikalischer 3D-Modelle am Beispiel eines handbemalten Modells der Stadt Solothurn im Jahre 1830. Zur Rekonstruktion der Geometrie und Textur werden verschiedene 3D-Messverfahren eingesetzt und miteinander verglichen. Es wird gezeigt, dass der möglichst frühzeitige und durchgängige Einsatz einer 3D-GIS-Technologie zwar etliche Zusatzanforderungen stellt, aber gleichzeitig große Vorteile bietet. Dies gilt auch für die vorgestellten Verfahren zur semi-automatischen Texturierung des Modells und für die vorgeschlagenen Lösungsansätze zur geometrischen Entzerrung des historischen Stadtmodells mittels eines modernen Filterungs- und Kollokationsansatzes. Ein interaktives 3D-Modell der historischen Stadt Solothurn im Jahre 1830 in Google Earth illustriert die Möglichkeiten und den Weiterentwicklungsbedarf auf dem Weg zum umfassenden historischen 3D-GIS.

---

## 1 Einleitung

Bei der aktuellen breiten Begeisterung für dreidimensionale Landschafts- und Stadtmodelle in Google Earth wird oft vergessen, dass die analogen Vorläufer dieser 3D-Modelle, wie zum Beispiel das Urschweizer Relief von Franz Ludwig Pfyffer von Wyhen von 1786 (NIEDERÖST 2005), eine Jahrhunderte alte Tradition haben. Gestern wie heute befinden sich diese 3D-Modelle im Spannungsfeld zwischen faszinierendem Kunstwerk und wertvollem Hilfsmittel für Planungen, Entscheidungen und wissenschaftliche Untersuchungen.

Der Großteil digitaler 3D-Rekonstruktionen von Kulturdenkmälern und historischen städtischen Szenarien beruht auf einer im weitesten Sinne bild-basierten Abtastung und Rekonstruktion noch existierender Objekte und Fragmente und auf einer darauf aufbauenden CAD-basierten Konstruktion nicht mehr existierender Teile. Zur automatisierten Rekonstruktion der Geometrie und Textur real existierender Objekte existiert eine Vielzahl ausgezeichneter Untersuchungen und Publikationen. Stellvertretend seien hier die Publikationen von (REMONDINO & EL-HAKIM 2006) zur photogrammetrischen 3D-Rekonstruktion,

von (POLLEFEYS et al. 2000) und (AKBARZADEH et al. 2006) zur 3D-Rekonstruktion aus Bildsequenzen und Videos sowie von (VOSSELMAN & DIJKMAN 2001) und (TEO et al. 2006) zur Extraktion aus Laserscanningdaten erwähnt. Zwar lässt sich die Erfassung und Rekonstruktion der 3D-Geometrie und Textur *existierender Objekte* mit den oben aufgeführten Ansätzen sehr schön automatisieren; bei der Rekonstruktion ganzer historischer städtischer 3D-Szenarien und ganzer Kulturdenkmäler stellt jedoch die (Re-)Konstruktion *nicht mehr existierender Objekte* oft das eigentliche Problem dar. Diese Modellierung geschieht meist in interdisziplinären Teams aus Geoinformationsspezialisten, Archäologinnen und Historikern und ist häufig ein langwieriger Prozess mit laufend korrigierten und verbesserten Hypothesen, der nur in Teilen automatisierbar ist.

Die Verwendung existierender physikalischer 3D-Stadtmodelle zur Rekonstruktion historischer städtischer Szenarien bietet hier eine Reihe von Vorteilen. Dazu gehören ein oft einheitlicher Detaillierungsgrad, ein homogenes Erscheinungsbild mit sorgfältig gemalten Texturen und möglicherweise ein historisches Gelände. Der mit Blick auf eine zeitgerechte Realisierung vollständiger städtischer Szenarien wohl wichtigste Vorteil ergibt sich aus der Tatsache, dass die verwendeten historischen 3D-Modelle oft über Jahrzehnte ausgestellt und benutzt wurden und dass dadurch die zugrundeliegenden Hypothesen von den meisten Beteiligten zumindest als Ausgangsbasis akzeptiert werden.

Dieser Beitrag dokumentiert die 3D-Rekonstruktion, welche von der Geomatik-Ab-

schlussklasse 2008 der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) durchgeführt worden war, sowie eine Reihe von darauf aufbauenden Untersuchungen. Mit dieser 3D-Rekonstruktion sollte einerseits die Basis für ein historisches 3D-Geoinformationssystem gelegt werden. Andererseits sollten die Resultate über den virtuellen Globus Google Earth der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Damit reiht sich das Projekt in die langjährige Projektinitiative ‚3D Cultural Heritage‘ des Instituts Vermessung und Geoinformation der FHNW ein ([www.fhnw.ch/habg/ivgi/forschung/3dheritage](http://www.fhnw.ch/habg/ivgi/forschung/3dheritage)), welche den Aufbau eines interaktiven 3D-Archivs wertvoller Kulturdenkmäler zum Ziel hat.

## 2 Die Stadt Solothurn und das historische Stadtmodell

Solothurn hat sein spätmittelalterlich-frühneuzeitliches Stadtbild bis heute erstaunlich gut bewahren können. Die Niederlegung der massiven barocken Befestigungswerke zwischen 1835 und 1905 war der bedeutendste städtebauliche Eingriff im Bereich der Altstadt. Von der neuzeitlichen Stadtentwicklung, die mit dem Anschluss Solothurns ans Bahnnetz 1857 einsetzte, blieb die Innenstadt weitgehend unberührt. Die Eingriffe ins Stadtbild beschränkten sich im späten 19. und im 20. Jahrhundert auf einzelne Neubauten, den Einbau von Schaufenstern, die Neugestaltung von Fassaden und die Auskernung einiger Altbauten. Die Altstadt von Solothurn ist deshalb eine wertvolle historische Quelle geblieben.



**Abb. 1:** Das Originalmodell von Solothurn um 1830 in der Übersicht.



**Abb. 2:** Das Originalmodell im Detail.



Das historische Stadtmodell zeigt die Stadt Solothurn ums Jahr 1830, kurz vor Beginn der Entfestigung. Das Modell wurde 1921 von Architekt Hans Langmack in Zürich im Auftrag des ehemaligen Verkehrs- und Verschönerungsvereins der Stadt Solothurn erstellt. Die Basis bildeten unter anderem vier Stadtpläne (1822, 1825, 1827, 1828), ein Skizzenbuch (1825–1827) und eine Vogelschau (1833), alle von Kartograph Johann Baptist Altermatt (SCHUBIGER 1994). Die Planaufnahmen und Skizzen von Altermatt zeichnen sich durch ihre herausragende Qualität, Genauigkeit und Detailtreue aus, die in unzähligen Bauuntersuchungen von der Kantonalen Denkmalpflege überprüft werden konnten. Eine systematische Fotokampagne ergänzte zwischen 1918 und 1920 die historischen Quellen. Das Modell wurde aus Karton gefertigt, weist handgemalte Gebäude- und Geländetexturen auf (Abb. 1 und 2) und ist in seiner Art typisch für die Entstehungsperiode, vergleiche auch historisches Stadtmodell von Zürich um 1800, ebenfalls von Hans Langmack (STADT ZÜRICH 2009). Das historische Modell von Solothurn hat einen Maßstab von circa 1 : 500, misst 2 m × 2,5 m und enthält circa 900 Gebäude. Das Modell ist im Museum Blumenstein, dem historischen Museum der Stadt Solothurn, ausgestellt.

Das 3D-Modell der Stadt Solothurn um 1830 bietet eine hervorragende Basis für die Erstellung eines historischen 3D-GIS. Die Datenbasis ist in Solothurn für den Zeitraum zwischen 1800 und 1850 äußerst breit. Im Staatsarchiv Solothurn liegen die originalen Erfassungsbögen der Volkszählungen von 1808, 1829, 1836 und 1850. Sie geben Auskunft über Alter, Geschlecht, Zivilstand, Verwandtschaftsbeziehungen, Beruf, Herkunft, Besitzverhältnisse und den sozialen Status sämtlicher Einwohner. Dazu kommen die Liegenschaftswerte, die seit 1818 von der Brandassekuranz erfasst wurden. Verknüpft mit diesen Daten, wird das historische 3D-GIS von Solothurn erstmals die räumliche Darstellung und Analyse der wirtschaftlichen und soziodemographischen Topographie einer vorindustriellen Kleinstadt in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts erlauben.

### 3 Datenerfassung und -verarbeitung

Für die Erfassung der 3D-Geometrie und der Texturinformation des historischen Modells einerseits und für Genauigkeitsuntersuchungen andererseits wurde eine Kombination der folgenden Messverfahren und -systeme eingesetzt: 1. *Präzisions-Handscanner* (Leica T-SCAN), 2. *Nahbereichsphotogrammetrie* und 3. *Videogrammetrie* (mit einer HD-Videokamera) zur experimentellen 3D-Rekonstruktion und zur Erstellung von Videomontagen beispielsweise für historische Hypothesen (wird in diesem Beitrag nicht weiter behandelt). Sämtliche Messungen wurden von Geomatik-Studierenden im Frühsommer 2008 über einen Zeitraum von zwei Wochen durchgeführt.

#### 3.1 Nahbereichsscanning

Im vorliegenden Projekt wurde unseres Wissens erstmals ein Hochpräzisions-Handscanner T-SCAN der Firma Leica Geosystems zur Erfassung eines historischen Stadtmodells eingesetzt. Das System kombiniert eine hohe Genauigkeit mit einer sehr hohen Punktdichte und einer sehr flexiblen Scannerführung und erfordert wenig bis keine künstlichen Passpunkte im Modell. Abgesehen vom hohen Beschaffungspreis bringt dieses Industriemesssystem somit ideale Voraussetzungen mit für die hochgenaue Rekonstruktion historischer Stadtmodelle und anderer kleinräumiger Kulturgüter.



Abb. 3: T-SCAN Laserscanner.



**Abb. 4:** Scannen des Stadtmodells mit T-SCAN.

Das T-SCAN-System besteht aus einem Laser Tracker (siehe Abb. 3, Hintergrund), der hochpräzise vertikale und horizontale Winkelcodierer für Winkelmessungen mit einem hoch präzisen Absolutdistanzmesser kombiniert. Dieser wird ergänzt durch einen frei geführten Handscanner (siehe Abb. 3, Vordergrund), welcher die Abtastung von Oberflächen aus fast beliebigen Materialien ermöglicht, ohne Zielmarken oder Puder zu erfordern. Die wichtigsten Merkmale des T-SCAN-Systems sind: eine Aufnahmezeit der Distanzmessung von 10 kHz, eine Genauigkeit der Punktmessung von  $\pm 30 \mu\text{m}$ , eine Punktdichte von 0,14–1,96 mm bei einem Sensorgewicht (inklusive Griff) von 1200 g.

Wie Abb. 4 zeigt, stellten die maximale Aufnahmedistanz von nur 16 cm in Kombination mit der sehr delikaten Natur und der be-



**Abb. 5:** Digitales Oberflächenmodell.

trächtlichen Ausdehnung des Modells große Anforderungen an das Erfassungsteam. Das Resultat des Scanvorgangs ist eine Punktwolke von ca. 80 Mio. Punkten mit einer mittleren Dichte von 10 Punkten/ $\text{mm}^2$  und einer Punktgenauigkeit von 0,1–0,2 mm in X-, Y- und Z-Richtung. Wegen des instabilen Holzbodens des Museums wurden damit die Werte aus der Herstellerspezifikation bei weitem nicht erreicht. Die erzielte Genauigkeit ist jedoch um eine Größenordnung besser als die zu erwartende Modellbaugenauigkeit. Abb. 5 zeigt das aus der Punktwolke abgeleitete digitale Oberflächenmodell.

### 3.2 Photogrammetrische Aufnahmen und Auswertungen

Mit den photogrammetrischen Aufnahmen wurden mehrere Ziele verfolgt: die Generierung eines Orthophoto-Mosaiks, die Auswertung von 3D-Objekten, die Gewinnung von Gebäudetexturen und die Erfassung und Nachbearbeitung des Geländemodells. Besondere Herausforderungen boten die limitierte Raumhöhe, die homogene Ausleuchtung des Modells sowie die Gewährleistung einer optimalen Tiefenschärfe in der konvergenten Aufnahmeconfiguration. Die Aufnahmen wurden mit einer digitalen Spiegelreflexkamera Nikon D200 mit 10 Megapixeln und einer Objektivbrennweite von 28 mm durchgeführt (siehe Abb. 6). Da im Modell keine Passpunktmarken angebracht werden durften, erfolgte die Signalisierung mit im Modell verteilten Steck-



**Abb. 6:** Bildaufnahmen Nahbereichsphotogrammetrie



nadeln (Kopfdurchmesser circa 3 mm), deren Position vorgängig mit dem Laserscanner bestimmt worden waren.

Auf Grund der unterschiedlichen Anforderungen wurden die Aufnahmen in zwei unterschiedlichen Messkampagnen durchgeführt:

- *Konvergente Aufnahmeconfiguration:* Diese Bildaufnahmen erfolgten mit dem Ziel der interaktiven 3D-Objektrekonstruktion und der Erfassung der Fassaden für die teilautomatische Texturierung. Die insgesamt 104 Bilder wurden gebietsweise in acht Teilblöcke (siehe Abb. 8) unterteilt, was die zeitgleiche Orientierung und interaktive Auswertung durch mehrere Teams erlaubte. Für die Bildorientierung wurde die Software iWitness ([www.iwitnessphoto.com](http://www.iwitnessphoto.com)), für die 3D-Auswertung der Dachlandschaften die Kombination von PHIDIAS ([www.phocad.de](http://www.phocad.de)) mit dem MicroStation CAD eingesetzt. Der Entscheid für eine interaktive Dachauswertung und eine automatische Gebäudemodellgenerierung im 3D-GIS war auf Grund der sehr komplexen Dachlandschaft der Altstadt, der hohen Anforderungen an den Detaillierungsgrad und wegen des Fehlens zuverlässiger Grundrissdaten gefällt worden.
- *Nadiraufnahmen / Simulation Luftbildaufnahmen:* Ziel dieser Aufnahmen waren stereoskopische Auswertungen (zum Beispiel der Wehranlage) und die Orthophotogenerierung. Sie wurden mit folgenden Parametern durchgeführt: Bildmaßstab 1 : 70 (Aufnahmehöhe 2,0 m), Längs- und Querüberdeckung 60%, zwei Streifen à sechs Bilder und zehn Vollpasspunkte. Die Bündelblock-

orientierung sowie die Auswertung erfolgten mit der Luftbildphotogrammetriesoftware LPS ([www.erdas.com](http://www.erdas.com)).

### 3.3 Genauigkeitsanalyse

Die folgenden Analysen sollen eine Beurteilung der geometrischen Genauigkeit der eingesetzten Mess- und Auswerteverfahren sowie der 3D-Rekonstruktion ermöglichen. Geometrische Fehler des Originalmodells und mögliche Transformationsansätze werden im Abschnitt 6 behandelt.

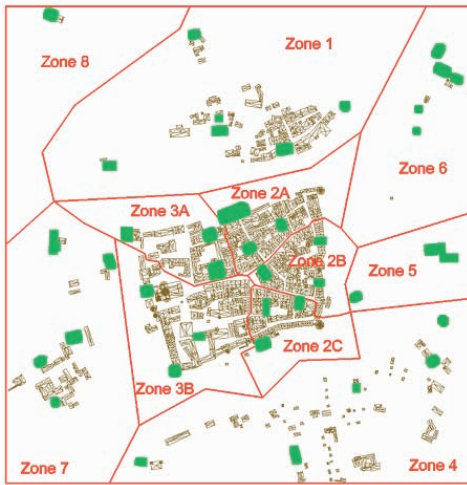
Die erzielten a posteriori Genauigkeiten der einzelnen Mess- und Auswerteverfahren sind in Tab. 1 aufgeführt. Im Fall der Laserscanning-Daten beruhen die Angaben auf dem Vergleich zweier unabhängiger Scans, im Fall der photogrammetrischen Aufnahmen (PG Nadir und PG konvergent) auf den Widersprüchen beziehungsweise Restklaffungen in den mittels Laserscanning bestimmten Passpunkten (PP).

Die Ergebnisse in Tab. 1 illustrieren die hohe 3D-Punktgenauigkeit des Laserscanners, welche trotz schwieriger Umgebungsbedingungen etwa um Faktor 3 besser ist als diejenige aus der photogrammetrischen Punktbestimmung. Diese hohe Genauigkeit des Laserscanners interessiert hier vor allem aus wissenschaftlicher Sicht und als Referenz für weitere Untersuchungen. Die praktischen Genauigkeitsanforderungen werden auch durch die beiden photogrammetrischen Einsatzszenarien erfüllt.

Zusätzlich zur oben aufgeführten Genauigkeit aus den Punktmessungen der photogram-

**Tab. 1:** Genauigkeiten der Punktbestimmung aus Quadratmitteln der Widersprüche (RMS) in den Passpunkten.

Messverfahren	$s_x, s_y, s_z$	Bemerkungen
Laserscanning	$s_{x,y,z} = 0,12 \text{ mm}$	Basis: Transformationsfehler zweier unabhängiger Scans
PG Nadir	$s_{x,y} = 0,15 \text{ mm}$ $s_z = 0,47 \text{ mm}$	Mittlerer Fehler Gewichtseinheit: $\sigma_0 = 0,31 \text{ Pixel} = 1,9 \mu\text{m}$ ( $m_b = \text{circa } 70$ ); mittlerer Fehler aus Widersprüchen in Passpunkten: $m_x = 0,17 \text{ mm}$ , $m_y = 0,14 \text{ mm}$ , $m_z = 0,47 \text{ mm}$ (8 PP)
PG konvergent	$s_{x,y,z} = 0,3-0,6 \text{ mm}$	Mittelwerte aus acht Bündelblöcken: Mittlerer Fehler Gewichtseinheit: $\sigma_0 = 0,7-1,5 \text{ Pixel} = 4,3-9,2 \mu\text{m}$ ( $\sigma m_b = \text{circa } 60$ ); mittlerer Fehler aus Widersprüchen in Passpunkten: $m_{x,y,z} = 0,25-0,56 \text{ mm}$ (6-7 PP pro Block)

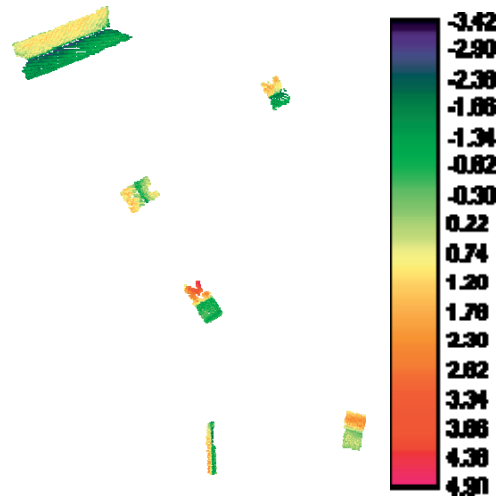


**Abb. 7:** Acht photogrammetrische Teilblöcke und grün markierte Vergleichsflächen.

metrischen Bildorientierung wurde auch die Genauigkeit des ausgewerteten 3D-Modells untersucht. Dazu wurden über das Projektgebiet verteilte Vergleichsflächen ausgewählt (vgl. grüne Flächen in Abb. 7 und einzelne Fläche in Abb. 8). Die mittlere vertikale Abweichung eines 3D-Punktes von den zugehörigen photogrammetrisch ausgewerteten Dachflächen beträgt 0,8–1,3 mm, was – unter der vereinfachten Annahme fehlerfreier Laserscanning-Daten – einem mittleren vertikalen Modellrekonstruktionsfehler von 0,4–0,7 m in der Realwelt entspricht. Darin enthalten sind Fehleranteile, die durch Generalisierungen bei der photogrammetrischen Auswertung verursacht wurden. Die Rekonstruktionsgenauigkeit im Submeterbereich ist vergleichbar mit der Rekonstruktionsgenauigkeit realer Stadtmodelle und ist um Faktoren besser als die Genauigkeit des ursprünglichen Modellbaus mit seinen vielen Unsicherheiten (Abschätzung Gebäudehöhen etc.).

#### 4 Aufbau 3D-GIS mit integrierter 3D-Rekonstruktion

Wird der Aufbau eines historischen 3D-Geoinformationssystems angestrebt, lohnt sich der möglichst frühe Einbezug einer geeigneten 3D-GIS-Technologie. Im vorliegenden Fall



**Abb. 8:** Testfläche mit Differenzen Dachlandschaft vs. 3D-Punktwolke (in [mm]).

wurde das 3D-GIS DILAS (Digital Landscape Server; NEBIKER 2003a) eingesetzt, eine instituteigene Forschungs- und Entwicklungsplattform, die bei verschiedenen Städten im produktiven Einsatz steht. DILAS ist eine vollständig DBMS-basierte 3D-GIS-Technologie mit einem objektorientierten Datenmodell zur Verwaltung von 3D-Objekten und Objekttexturen. Das System bietet einen umfassenden Support für 3D-Stadtmodelle – inklusive Gelände- und Oberflächenmodelle sowie Orthophotos. DILAS ermöglicht eine flexible, regelbasierte Konstruktion unterschiedlicher 3D-Gebäudemodelltypen aus Kombinationen von Gebäudegrundrissen, 3D-Punktwolken, thematischen Daten und/oder 3D-Dachgeometrien. Seit kurzem bietet DILAS auch einen CityGML-Export. Frühere Untersuchungen zum Einsatz von 3D-GIS-Technologien in der Rekonstruktion und Dokumentation von Kulturdenkmälern finden sich in (NEBIKER 2003b und WÜST et al. 2004).

Das Datenmodell des historischen 3D-GIS von Solothurn wurde in dieser ersten Phase bewusst einfach gehalten und konzentriert sich auf die wichtigsten Objektmerkmale, welche die geplanten späteren Modellerweiterungen um historische Daten (zum Beispiel soziodemographische Daten zu den einzelnen Gebäuden) gewährleisten. Auf Grund der vollständigen DBMS-Integration von DILAS

sind solche Modelländerungen über SQL relativ einfach möglich. Das aktuelle Datenmodell erlaubt eine Unterscheidung nach Gebäudetypen (zum Beispiel Kirche, Wohnhaus, etc.) und enthält als wichtigstes Element einen eindeutigen Objektidentifikator für jedes Gebäude, welcher vom beteiligten Historiker auf Grund historischer Katasterdaten bestimmt wurde. Das Basismodell ermöglicht auch die bereits geplante Einführung einer einfachen applikations-basierten temporalen Erweiterung wie sie in (OOSTEROM 2000) beschrieben wird.

Nach einer auf XML-Regeln basierenden Übernahme der photogrammetrisch erfassten Dachlandschaften in DILAS und der anschließenden Objektstrukturierung mit Hilfe der historischen Katasterdaten wurden die Gebäudemodelle in DILAS automatisch generiert. Dabei wurden die Begrenzungen der Dachflächen mit dem Geländemodell aus den Laserscanningdaten verschnitten.

## 5 Semi-automatische Texturierung des 3D-Modells

Eine der größten Herausforderungen bei der Rekonstruktion historischer städtischer Szenarien ist die Texturierung der Gebäude, welche sich im Spannungsfeld zwischen mög-

lichst großer Realitätstreue und kartographischer Abstraktion bewegt. Entsprechend breit ist das Spektrum der Lösungsansätze. Handbemalte historische 3D-Modelle können als frühe 3D-Karten betrachtet werden, mit einer oft hohen künstlerischen graphischen Qualität, die im vorliegenden Fall ins digitale Modell übertragen werden sollte. Durch eine Übernahme der Originaltexturen erhält die digitale Stadt ein modellhaftes Erscheinungsbild mit einer durchaus erwünschten kartographischen Abstraktion, welche den vielen Unsicherheiten und Hypothesen eines historischen Modells gerecht wird. Zudem wirken die ‚handgefertigten‘ abstrahierten Texturen lebendiger als die oft verwendeten generischen, künstlichen Texturen mit ihrem eher leblosen und repetitiven Charakter.

Sollen größere städtische Szenarien mit mehreren Hundert 3D-Objekten mit photographischen Originaltexturen versehen werden, so ist eine weitgehende Automatisierung unabdingbar. Im Falle von Solothurn 1830 wurde die institutseigene Virtual Globe Technologie «i3D» (IVGI 2009a) um eine automatische Texturierungsfunktion erweitert. Basierend auf den Bilddaten, Orientierungs- und Verzeichnungsparametern aus der photogrammetrischen Auswertung und den 3D-Objektgeometrien aus dem 3D-GIS führt i3D eine objektweise Texturzuweisung durch, und baut



Abb. 9: Solothurn 1830 in Google Earth (Ansicht aus Süden mit Jura im Hintergrund).

anschließend pro Objekt einen Texturatlas auf. Mit Ausnahme der optimalen Bildwahl, die auf Grund der vielen Verdeckungen im Modell noch manuell vorgenommen werden muss, verläuft der Texturierungsprozess in i3D automatisch. Am Schluss des Prozesses kann das texturierte 3D-Modell im COLLADA-Format ([www.collada.org](http://www.collada.org)) aus i3D exportiert und in jeden COLLADA-fähigen Viewer (z. B. Google Earth oder Cinema4D) importiert werden, wobei zur definitiven Georeferenzierung je nach geodätischem Modell des Viewers zusätzliche Transformationen erforderlich sind (z. B. bei Google Earth).

Abb. 9 zeigt die texturierte 3D-Rekonstruktion von „Solothurn 1830“ in Google Earth. Der Link zur 3D-Szene sowie ein Beitrag des Schweizer Fernsehens über die Entstehung des 3D-Modells sind auf der Homepage des Instituts Vermessung und Geoinformation zu finden (IVGI 2009b).

## 6 Verzerrungsanalysen und Transformationsansätze

Physikalische Stadtmodelle sind aus praktischen Gründen oft aus Teilblöcken bzw. Platten zusammengesetzt, was unweigerlich zu Unstetigkeiten an den Plattenrändern führt. Demgegenüber weisen traditionelle (amtliche) Vermessungen innerhalb eines einzelnen Siedlungsgebiets deutlich geringere Inhomogenitäten auf. Somit ist die Entzerrungs- und Transformationsproblematik bei einer Rekon-

struktion aus physikalischen Modellen deutlich anspruchsvoller als bei Rekonstruktionen auf der Basis realer Fragmente, die in traditionelle geodätische Bezugssysteme eingebunden sind.

Als Referenzdaten für die Verzerrungsanalyse im historischen Stadtmodell Solothurn standen aktuelle amtliche Vermessungsdaten der Stadt Solothurn zur Verfügung. Als Passpunkte wurden die Ecken von Gebäuden gewählt, die bereits 1830 vorhanden waren und deren aktuelle Koordinaten mit einer Lagegenauigkeit von besser als 10 cm bekannt sind. Insgesamt standen so 195 über das ganze Gebiet verteilte Punkte zur Verfügung.

Eine erste Analyse mittels ebener Helmerttransformation bestätigte die Größenordnung der systematischen Restfehler im Modell, welche bei einer Überlagerung des aktuellen 3D-Modells mit der heutigen Situation in Google Earth sichtbar werden. Der maximale Restfehler eines Punktes nach der Helmerttransformation beträgt 2,7 cm im Modell beziehungsweise 13,2 m in der Realwelt, was einer Verschiebung um mehr als eine Hausbreite entspricht.

Die folgende Analyse der Verzerrung des analogen Stadtmodells wurde mit *semiparametrischer Regression* (Kollokation und Filterung) durchgeführt. Dabei wurden aus 195 Passpunkten die Komponenten des Modells

Landeskoordinaten  
= helmerttransformierte Modellkoordinaten  
+ Signal + Rauschen

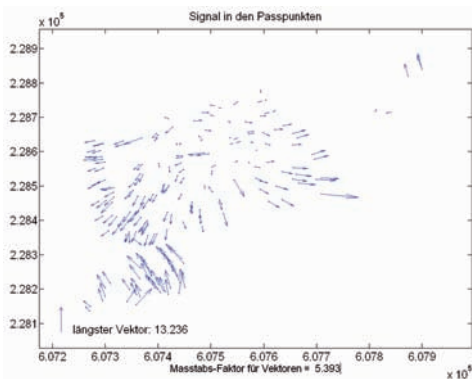


Abb. 10: Signalvektoren in den 195 Passpunkten, Einheit [m].

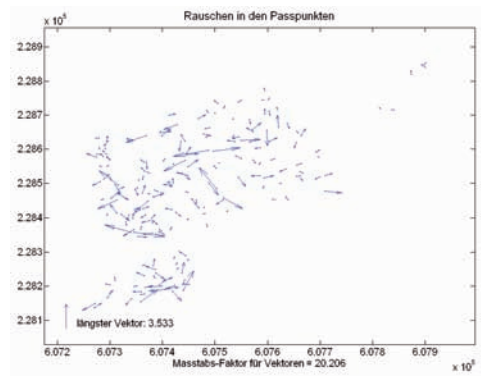
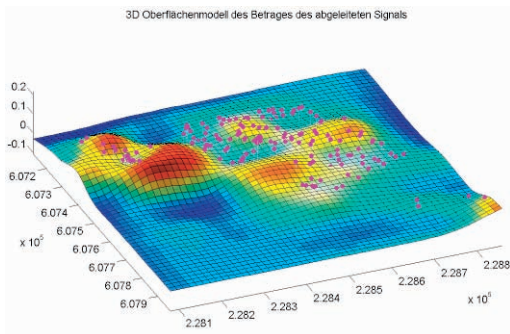


Abb. 11: Rauschvektoren in den 195 Passpunkten, Einheit [m].

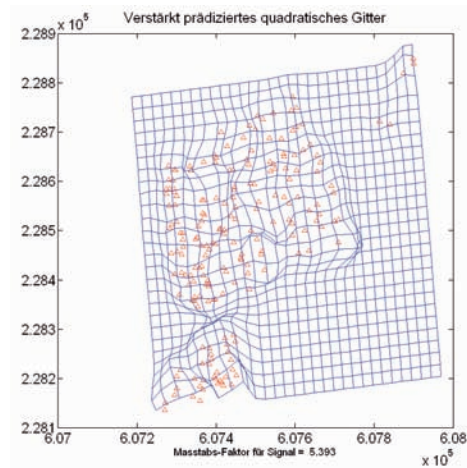




**Abb. 12:** 3D-Oberfläche des Betrages des abgeleiteten Signals

mit Regularisierung durch verallgemeinerte Kreuzvalidierung (GCV) geschätzt. Das Signal beschreibt die systematischen Verzerrungen des Modells, das Rauschen die zufälligen Abweichungen. Einzelheiten des Verfahrens finden sich in (FISCHER & BRÜHLMANN 2006 und GREEN & SILVERMAN 1994). In mehreren Diplomarbeiten wurde das Verfahren an der FHNW als Matlab-Programm implementiert. Abb. 10 zeigt die Signalvektoren mit einer maximalen Länge von 13,24 m. Die Rauschvektoren (Abb. 11) streuen zufällig zweidimensional normalverteilt und weisen keinen systematischen Anteil auf. Im Modell stehen die Häuser der Altstadt etwas zu eng zusammen, und der kleine Stadtteil südlich des Aare-Flusses liegt zu weit südlich. Die Aare zwischen den beidufrigen Stadtteilen ist im Modell etwas zu breit geraten.

Mit diesem Ansatz wird das ganze durch die Passpunkte gegebene Gebiet (das heißt deren konvexe Hülle) gesamthaft ausgewertet. Die Untersuchung der Änderung des Signals erlaubt die Feststellung der Schollen oder Regionen ähnlicher systematischer Verzerrungen der Punkte des Stadtmodells. Als Änderung nehmen wir den Betrag der Ableitung des Signals, dargestellt als Funktion des Ortes in Abb. 12. Die markanteste Schollengrenze liegt im Gebiet der Aare zwischen den beidufrigen Stadtteilen. Diese beiden Stadtteile stellen die zwei maßgebenden Schollen dar und



**Abb. 13:** Transformatiertes quadratisches Gitter, Verzerrungen verstärkt

lassen sich in diesem Fall durch je eine Helmerttransformation gut transformieren.

In den bisherigen Untersuchungen zur Transformation analoger Modelle herrschen maschenweise Transformationsansätze (zum Beispiel affin, bilinear oder projektiv) vor (NIEDERÖST 2005). Ein Nachteil dieser Ansätze ist die direkte Abhängigkeit von Fehlern in den Stützpunktkoordinaten der Dreiecks- oder Vierecksmaschen. Der Vorteil der semiparametrischen Regression besteht darin, dass ein durch Passpunkte gegebenes Gebiet gesamthaft mit einem Modell beschrieben wird. Dabei können die systematischen Abweichungen von einer Helmerttransformation detektiert werden, was erst eine Ermittlung der Schollen der Transformation über die Signaländerung erlaubt. Der vorliegende Ansatz stellt somit ein gutes Werkzeug zur zuverlässigen Festlegung der einzelnen Maschen (siehe Abb. 13) für eine anschließende maschenweise Transformation zur Verfügung.

## 7 Fazit und Ausblick

Im Beitrag wurden Verfahren und Lösungsansätze zur effizienten und realitätsgetreuen 3D-Rekonstruktion städtischer 3D-Szenarien auf der Basis historischer Stadtmodelle vorgestellt und diskutiert. Damit konnte das historische

Solothurn um 1830 digitalisiert und als Basisdatensatz in ein historisches 3D-GIS integriert sowie als attraktive interaktive 3D-Szene publiziert werden.

Der erstmals für diese Art von Anwendung eingesetzte T-SCAN Handscanner hat sich auf Grund der hohen Genauigkeit, Punktdichte und Homogenität der erzeugten 3D-Punkt- und Homogenität der erzeugten 3D-Punkt- und Homogenität der erzeugten 3D-Punkt- wolke und der flexiblen Scannerführung sehr bewährt. Interessant wären weiterführende Untersuchungen mit den erwähnten automatischen Gebäude-Extraktionsansätzen auf Punktwolkenbasis und ein Vergleich mit der vorliegenden photogrammetrischen Gebäudeauswertung. Das photogrammetrische Messverfahren ist für die Gewinnung von Texturdaten nach wie vor unabdingbar. Es liefert vergleichbar gute Genauigkeiten und könnte auch als alleiniges Messverfahren eingesetzt werden.

Der Einsatz einer 3D-GIS-Technologie wie DILAS hat sich bewährt. So bietet die konsequente objektweise Strukturierung des 3D-Stadtmodells Vorteile, von der Datenmodellierung und der Verknüpfung mit bestehenden historischen Daten über die automatische Texturierung und die Organisation von Texturatlanten bis hin zur optimierten Aufbereitung großer, streamingfähiger 3D-Szenen. Die Übernahme der handgemalten Originaltextur konnte mit dem teilautomatisierten Verfahren erfolgreich durchgeführt werden und hat damit auch grafisch ein modellnahes Resultat geliefert.

Die vorgestellte Verzerrungsanalyse des Originalmodells hat den Bedarf nach modernen Transformationsansätzen im Umgang mit historischen Stadtmodellen aufgezeigt. Der Lösungsansatz auf Basis der semiparametrischen Regression wird weiter verfolgt und sowohl für die Entzerrung des historischen Orthophotos als auch für die Entzerrung des 3D-Stadtmodells direkt im 3D-GIS implementiert. Als Grundlage für zukünftige interdisziplinäre wissenschaftliche Untersuchungen soll das Datenmodell des historischen 3D-GIS Solothurn schrittweise um temporale Funktionalität und historische Daten erweitert werden.

## Dank

Wir bedanken uns bei den folgenden Personen und Institutionen: Michael Baumgartner, MfB Geoconsulting GmbH für die Initiative zum Projekt, Leica Geosystems AG für die Zurverfügungstellung eines T-SCAN-Systems, Stefan Blank, Amt für Denkmalpflege und Archäologie des Kantons Solothurn und Roland Blaser, Wissenschaftsjournalist für die filmische Dokumentation des Projekts.

## Literatur

- AKBARZADEH, A., FRAHM, J.-M., MORDOHAJ, P., CLIPP, B., ENGELS, C., GALLUP, D., MERRELL, P., PHELPS, M., SINHA, S., TALTON, B., WANG, L., YANG, Q., STEWENIUS, H., YANG, R., WELCH, G., TOWLES, H., NISTÉR, D. & POLLEFEYS, M., 2006: Towards Urban 3D Reconstruction from Video. – Third International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission (3DPVT'06): 1–8.
- FISCHER, B. & BRÜHLMANN, P., 2006: On the Application of Nonparametric Regression Methods to Geodetic Data. – XXIII FIG Congress, Munich, Germany.
- GREEN, P.J. & SILVERMAN, B.W., 1994: Nonparametric regression and generalized linear models a roughness penalty approach. – Chapman & Hall, London IX: 182 Seiten.
- IVGI, 2009a: i3D Virtual Globe Technologie. – <http://www.fhnw.ch/habg/ivgi/forschung/i3d>. Seitenzugriff: 28. 1. 2009.
- IVGI, 2009b: Solothurn 1830 in Google Earth. – <http://www.fhnw.ch/habg/ivgi/studienarbeiten/solothurn3d>. Seitenzugriff: 28. 1. 2009.
- NEBIKER, S., 2003a: DILAS – The Digital Landscape Server for the Generation and Management of Large 3D City Models. – Photogrammetric Week ,03. Wichmann, Heidelberg: 227–236.
- NEBIKER, S., 2003b: Support for visualisation and animation in a scalable 3D GIS environment – motivation, concepts and implementation. – International Workshop on Visualisation and Animation of Reality-based 3D Models. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 34 (5/W10): auf CD.
- NIEDERÖST, J., 2005: Das Relief der Urschweiz von Franz Ludwig Pfyffer (1716–1802) 3D-Rekonstruktion, Analyse und Interpretation. – Institute of Geodesy and Photogrammetry Swiss Federal Institute of Technology ETH, Zürich: 211 Seiten.

- OOSTEROM, P.V., 2000: Time in cadastral maps. – In: Time in GIS issues in spatio-temporal modelling. – NCG Nederlandse Commissie voor Geodesie, Delft: 36–45.
- POLLEFEYS, M., KOCH, R., VERGAUWEN, M. & VAN GOOL, L., 2000: Automated reconstruction of 3D scenes from sequences of images. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **55** (4): 251–267.
- REMONDINO, F. & EL-HAKIM, S., 2006: Image-based 3D Modelling: A Review. – The Photogrammetric Record **21** (115): 269–291.
- SCHUBIGER, B., 1994: Die Stadt Solothurn I mit einer Einleitung zum Kanton Solothurn Geschichtlicher Ueberblick, Stadtanlage und -entwicklung, Befestigung, Wasserversorgung und Brunnen, Denkmäler, Brücken und Verkehrsbauten. – Wiese Verlag, Basel **XX**: 342 Seiten.
- Stadt Zürich, 2009: Zürich um 1800 – Historisches Stadtmodell, <http://www.stadt-zuerich.ch.Seitenzugriff>: 28. 1. 2009.
- TEO, T.-A., RAU, J.-Y., CHEN, L.-C., LIU, J.-K. & HSU, W.-C. 2006: Reconstruction of Complex Buildings using LIDAR and 2D Maps. – Innovations in 3D Geo Information Systems: 345–354.
- VOSSelman, G. & DIJKMAN, S., 2001: 3D Building Model Reconstruction from Point Clouds and Ground Plans. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing **34** (3/W4): 37–43.
- WÜST, T., NEBIKER, S. & LANDOLT, R., 2004: Applying the 3D GIS DILAS to Archaeology and Cultural Heritage Projects. – Requirements and First Results. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **35** (B5): 407–412.

## Adressen der Autoren:

Prof. Dr. Stephan Nebiker, Dipl.-Ing. Andreas Barmettler & Prof. Dr. Beat Fischer, Fachhochschule Nordwestschweiz, Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik, Institut Vermessung und Geo-information, CH-4132 Muttenz, Tel.: +41-61-467 43 36, e-mail: [stephan.nebiker@fhnw.ch](mailto:stephan.nebiker@fhnw.ch), [andreas.barmettler@fhnw.ch](mailto:andreas.barmettler@fhnw.ch), [beat.fischer@fhnw.ch](mailto:beat.fischer@fhnw.ch)

Dr. phil. ERICH WEBER. Museum Blumenstein – Historisches Museum der Stadt Solothurn, CH-4500 Solothurn, Tel.: +41-32-622 54 70, e-mail: [erich.weber@egs.so.ch](mailto:erich.weber@egs.so.ch)

Manuskript eingereicht: Februar 2009

Angenommen: Februar 2009





## Nutzung historischer Pläne und Bilder für die Stadtforschungen in Baalbek/Libanon

FRANK HENZE & HEIKE LEHMANN, Cottbus; BETTINA BRUSCHKE, Dresden

**Keywords:** Historic maps and images, image orientation, ortho-image generation, 3D reconstruction, urban history

**Summary:** *Analysis of Historic Maps and Images for Research on Urban Development of Baalbek/Lebanon.* The analysis of historic maps and images is an important part of current research on the development of Baalbek from antiquity until the 20th century. The archaeological project aims at discovering the urban layout of the city in different historical periods of time and the understanding of conditions for urban transformations. Drawings, plans and photographs of former investigations between the beginning of the 20th century and the 1960s are the basis for current observations. Especially the reconstruction of the late ottoman town is done on the basis of photogrammetric images taken by Albrecht Meydenbauer in the early 20th century and aerial photographs of the French mandate period during the 1930s. With a subsequent orientation of selected images, including the estimation of camera parameters, it was possible to generate several orthoimage maps from vertical aerial images for different overflights. 3D geometries could be obtained from oblique aerial images for the creation of a 3D city model for a partially destroyed central area of Baalbek using CityGML.

**Zusammenfassung:** Die Analyse historischer Karten und Bilder ist wichtiger Bestandteil der Forschungsarbeiten zur Stadtentwicklung Baalbeks von der Antike bis ins 20. Jahrhundert. Im Rahmen des baugeschichtlich-archäologischen Forschungsprojektes sollen u. a. der Stadtausbau zu verschiedenen Zeiten sowie die Bedingungen für urbane Transformationsprozesse untersucht werden. Zeichnungen, Pläne und Fotografien vorangegangener Untersuchungen zwischen Anfang des 20. Jahrhunderts und den 1960er Jahren bilden die Grundlage für die aktuellen Forschungen. Die Rekonstruktion der spätosmanischen Stadt erfolgt dabei mit Hilfe photogrammetrischer Aufnahmen von Albrecht Meydenbauer aus dem frühen 20. Jahrhundert sowie durch Auswertung historischer Luftbilder der französischen Mandatszeit aus den 1930er Jahren. Über eine nachträgliche Orientierung ausgewählter Bilder, unter Mitbestimmung der inneren Orientierung, konnten aus den Vertikal-aufnahmen Orthobildpläne für verschiedene Befliegungen erstellt werden. Aus historischen Schrägluftbildern wurden 3D Geometrien für die Rekonstruktion eines zum Teil zerstörten Stadtviertels gewonnen. Aus diesen Daten wurde mit Hilfe von CityGML exemplarisch ein 3D Stadtmodell für einen zentralen Bereich Baalbeks erstellt.

---

### 1 Die Stadt Baalbek und ihre Forschungsgeschichte

Die monumentalen Ruinen des Jupiterheiligtums der antiken Stadt Heliopolis prägen bis heute das Stadtbild Baalbeks, einer modernen Stadt in der nördlichen Beqaa-Ebene im Libanon. Heliopolis war in der römischen Antike ein wichtiges Pilgerzentrum mit überregionaler Bedeutung. Baalbek/Heliopolis blieb seitdem kontinuierlich besiedelt, weshalb die an-

tike Stadt im Laufe der Jahrhunderte durch neue Bauten überformt wurde. Heute wird das Umfeld des Jupiterheiligtums vom Altstadt-kern der modernen Stadt Baalbek eingenommen und das Heiligtum erfuhr seit der Spätantike neue Nutzungen, die jeweils mit verschiedenen Um- und Einbauten verbunden waren.

Ab dem 17. Jahrhundert zogen die Überreste der römischen Prachtbauten europäische Reisende in ihren Bann. Die Ruinen wurden in Reisetagebüchern detailliert beschrieben



**Abb. 1:** Romantisierende Darstellung der Römischen Ruinen Baalbeks von David Roberts, der Baalbek im Mai 1839 besuchte (ROBERTS & CROLY 1843, Vol. II, Plate 36).

und vor Ort in Zeichnungen und Stichen festgehalten (siehe Abb. 1 und 2). Im Jahre 1898 war Baalbek eine Station auf der Orientreise des Deutschen Kaisers Wilhelm II. (CARMEL & EJAL 1899). Auf seine Veranlassung fanden von 1900 bis 1904 die ersten umfassenden wissenschaftlichen Untersuchungen der römischen Bauten unter Leitung Theodor Wiegands statt. Die Ergebnisse der deutschen Baalbek-Expedition wurden zwischen 1921 und 1925 in drei Bänden publiziert (WIEGAND 1921/1923/1925). Neben den in der Publikation enthaltenen Baubeschreibungen und umfangreichen Bauaufnahmeplänen, stehen uns heute aus der Zeit der ersten Ausgrabungen eine Messtischaufnahme Gottlieb Schumachers (siehe Abb. 3) sowie etwa 300 Messbildaufnahmen Albrecht Meydenbauers zur Verfügung.

Weitere Untersuchungen der römischen Hinterlassenschaften in Baalbek folgten in den 1930er Jahren durch französische sowie in den 1960er und 1970er Jahren durch libanesische Wissenschaftler. Während sich die französischen Ausgrabungen auf die bekannten Ruinen und die Klärung detaillierter Fragen zum Kult in Baalbek konzentrierten (COLLART & COUPEL 1951/1977), wurden unter libanesischer Leitung riesige neue Areale frei-

gelegt. Der Verlauf der Ausgrabungen ist im Archiv der Libanesischen Antikenverwaltung in Beirut in tausenden von Fotos dokumentiert. Durch den Ausbruch des Libanesischen Bürgerkrieges mussten die Arbeiten 1975 abrupt beendet werden, so dass Bereiche nicht fertig ausgegraben wurden oder undokumentiert blieben.

## 2 Aktuelle Forschungen

Seit 2002 finden in Kooperation zwischen der Libanesischen Antikenverwaltung (DGA), der Orientabteilung des Deutschen Archäologischen Instituts Berlin (DAI) und der BTU Cottbus neue Feldforschungen in Baalbek statt (VAN ESS 2003/2005/2008). In Abgrenzung zu den historischen Altgrabungen ist das von der DFG finanzierte Projekt nicht auf die Untersuchung der römischen Bauten beschränkt, sondern hat die Erforschung der Stadtentwicklung und urbanen Struktur Baalbeks seit der Antike bis ins 20. Jahrhundert zum Ziel.

Die Arbeiten in Baalbek konzentrieren sich auf die abschließende Dokumentation und Auswertung bereits ausgegrabener Bereiche im Stadtgebiet. Anhand dieser Untersuchungen sollen Fragen zu topografischen, städte-



**Abb. 2:** Stadtansicht Baalbeks von Südwesten vor dem verheerenden Erdbeben von 1759, Kupferstich Robert Wood 1851 (Wood 1857, Plate II).

baulichen, ökonomischen und gesellschaftlichen Grundlagen des Heiligtums und der Stadt in verschiedenen Epochen geklärt werden.

Historische Karten und Bilder spielen für die aktuellen Forschungen eine entscheidende Rolle, da vor allem in den letzten 100 Jahren zum Teil erhebliche Veränderungen in der Stadt und am Heiligtum vorgenommen wurden. Auf Grundlage von Bauaufnahmen, Zeichnungen und Fotografien lässt sich nicht mehr erhaltene Substanz rekonstruieren und mit neuen Fragestellungen analysieren. Das historische Material liefert einerseits Informationen zum generellen Charakter der Stadt in verschiedenen Zeiten. Andererseits bietet das Bildmaterial die Möglichkeit, durch photogrammetrische Methoden 2D und 3D Geometrien einzelner Bauten sowie Daten für ein digitales Geländemodell (DGM) zu gewinnen.

### 3 Darstellungen von Reisenden der letzten Jahrhunderte

Wichtige Informationen aus einer Zeit, aus der ansonsten wenige Zeugnisse zur Stadtgeschichte Baalbeks vorhanden sind, überliefern die seit dem 17. Jahrhundert entstandenen Stiche und Zeichnungen von Stadtansichten (siehe Abb. 1 und 2). Der Wert dieser frühen Darstellungen für die aktuelle Stadtforschung lässt sich exemplarisch an der Prachtpublikation Robert Woods (Wood 1757), der 1751 Baalbek be-

suchte, darstellen. Die Publikation umfasst neben einer detaillierten Beschreibung der Ruinen 46 Tafeln mit Stichen, darunter ein Stadtplan und eine Stadtansicht von Südwesten (siehe Abb. 2). Diesen Darstellungen ist eine Fülle an Informationen zum Zustand der Ruinen und dem Charakter der Stadt zu entnehmen, die im Kontext mit späteren Untersuchungen zur Klärung der Stadtentwicklung beitragen. Die Abbildungen und Beschreibungen Woods geben zum Beispiel erste Hinweise auf den Verlauf und das Aussehen der Stadtmauer. Zusammen mit den geografischen Informationen aus dem Schumacherplan (siehe Abb. 3) war es möglich, den Verlauf der Stadtmauer zu rekonstruieren und in archäologischen Sondagen nachzuweisen. Damit ergibt sich die Möglichkeit der Datierung des bisher in seiner Zeitstellung ungeklärten Bauwerks.

Des Weiteren lässt sich den Abbildungen der städtische Charakter Baalbeks mit öffentlichen Bauten, erkennbar an den Kuppeln der Bäder und den Minaretten der Moscheen, entnehmen. Woods Zeichnungen der Ruinen belegen, dass das osmanische Dorf im großen Altarhof des Jupiterheiligtums zu dieser Zeit schon aufgegeben und zerstört war (Wiegand 1925; siehe Abb. 4). Spätere Zeichnungen aus dem 18. und frühen 19. Jahrhundert zeigen Baalbek als dörfliche Oase mit wenigen rund um die Ruinen gelegenen Häusern. Zugunsten romantischer Bildkompositionen zeigen die-



**Abb. 3:** Messtischaufnahme Baalbeks von Gottlieb Schumacher aus dem Jahr 1904 (VAN ESS & WEBER 1999, S. 6).

se Darstellungen nicht immer ein genaues Abbild der Umgebung des Heiligtums und müssen deshalb hinsichtlich ihres Wahrheitsgehaltes hinterfragt werden. Die Beobachtungen zum Verfall der Stadt im späten 18. und frühen 19. Jahrhundert decken sich jedoch mit Ergebnissen der Untersuchungen der heute erhaltenen traditionellen Wohnbebauung. Die dendrochronologische Auswertung von Bauhölzern ergab, dass die meisten Häuser erst im ausgehenden 19. Jahrhundert entstanden sind (LEHMANN 2008). Damit sind die historischen Abbildungen ein wichtiges Zeugnis für die Zerstörung Baalbeks beim Erdbeben von 1759 (AMBRASEYS & BARAZANGI 1989), von der sich die Stadt erst im späten 19. Jahrhundert erholt hat.

#### 4 Wissenschaftliche Dokumentationen der Altgrabungen

Die Altgrabungen hatten vor allem die Erforschung des römischen Erbes der Stadt zum Ziel, weshalb die spätere Überbauung der an-

tiken Ruinen zwar in Grundrissen aufgenommen und dokumentiert, dann aber zum großen Teil abgetragen wurde (siehe Abb. 4). An anderen Stellen wurden die römischen Bauten wieder errichtet oder, wenn sie einsturzgefährdet erschienen, durch Sicherungsmaßnahmen verändert.

Historisches Bild- und Kartenmaterial ist heute oft die einzige Quelle, um die zerstörten oder durch Rekonstruktionen veränderten Befunde analysieren zu können. Dafür werden nicht nur die Plangrundlagen benötigt, sondern auch die damals entstandenen Fotos inhaltlich ausgewertet. Anhand der Fotos lassen sich die ursprünglichen Fundsituationen zurückverfolgen und Rekonstruktionsprozesse nachvollziehen.

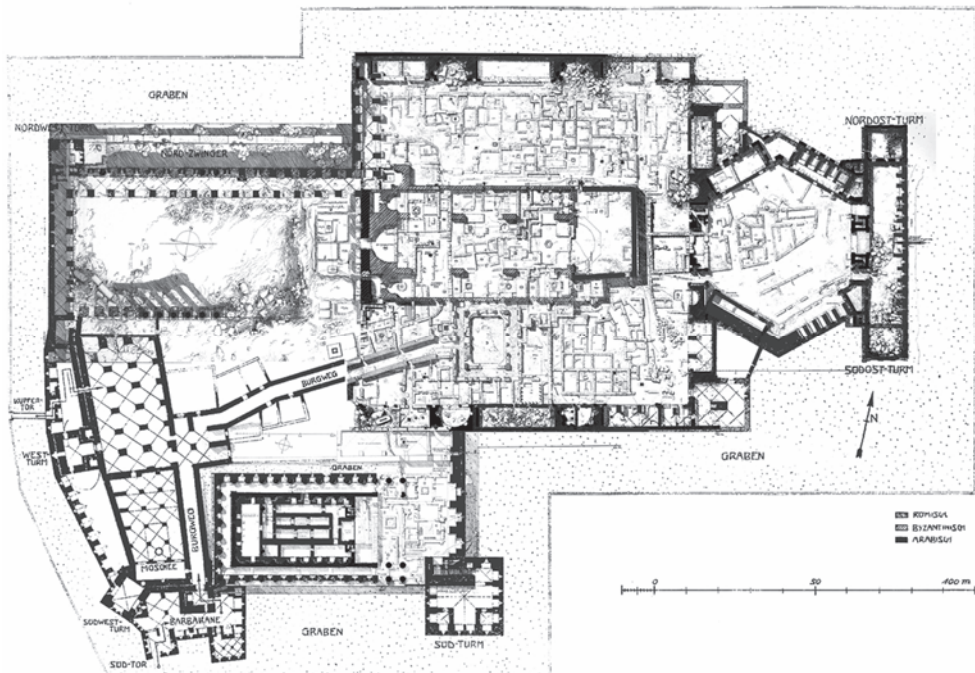
#### 4.1 Einbindung von Planunterlagen

Die zeichnerische Dokumentation des aktuellen Forschungsprojektes ist in ein übergeordnetes Koordinatensystem eingebunden. Damit das historische Planmaterial für aktuelle Fragestellungen und als Basis für weitergehende Untersuchungen genutzt werden kann, müssen die Pläne entzerrt und georeferenziert werden.

Die Einbindung in das örtliche Koordinatensystem ist prinzipiell über identische Objektpunkte oder ggf. auch über Koordinatenangaben in den Plänen möglich. Zum Teil zeigen sich dabei jedoch erhebliche Abweichungen zu den präzisen aktuellen Messungen. Da es in der Regel keine Dokumentation über die Vorgehensweise bei den damaligen Aufnahmen gibt, lassen sich die Ursachen der Abweichungen kaum klären.

Die früheste kartografische Darstellung, die aufgrund des Aufnahmeverfahrens für eine geometrische Auswertung geeignet erscheint, ist die Messtischaufnahme von Gottlieb Schumacher aus dem Jahr 1904 (siehe Abb. 3). Das Verfahren der Messtischaufnahme wurde bereits Anfang des 17. Jahrhunderts eingeführt und in erweiterter Form und mit modernen Messgeräten bis zum Ende des 20. Jahrhunderts für die topografische Aufnahme vor Ort eingesetzt (DEUMLICH & STAIGER 2002). Die vorliegende Messtischaufnahme von Baalbek ist im Maßstab 1 : 5 000 für ein Ge-





**Abb. 4:** Das Jupiterheiligtum mit nachantiken Einbauten. Montage von Bauaufnahmeplänen der deutschen Altgrabung (WIEGAND 1925).

biet von ca.  $2 \times 2,5$  km<sup>2</sup> erstellt worden und zeigt, neben der Ausdehnung des Ortes, auch das Straßen- und Wegenetz, inkl. der Eisenbahnstrecke nach Homs sowie Informationen zur Nutzung und Bezeichnung bestimmter Areale und Gebäude. Für die Georeferenzierung des Plans wurden an den in der Karte dargestellten, markanten Bauwerken ausgesuchte Punkte tachymetrisch bestimmt. Trotz einer gleichmäßigen Verteilung dieser Referenzpunkte über das gesamte historische Stadtgebiet bleiben nach einer Affinkorrektur Spannungen von bis zu 30 m (!) zu den aktuellen geodätischen Messungen. Diese großen Abweichungen lassen sich aus der erreichbaren Genauigkeit für Messtischaufnahmen allein nicht erklären. Die Gewinnung verlässlicher geometrischer Informationen aus diesem Plan ist daher nicht möglich.

Die Bauaufnahmepläne der deutschen Grabung zu Beginn des 20. Jahrhunderts sind der Grabungspublikation von Theodor Wiegand (WIEGAND 1921/1923/1925) entnommen und dokumentieren den Zustand der großen Tempelanlage (siehe Abb. 4) sowie den Bereich des

sog. Venusareals nach der ersten Freilegung. Auch auf diesen Plänen ist kein Koordinatengitter eingezeichnet, so dass eine vorgeschaltete, partielle Plankorrektur nicht möglich ist. Bei der Georeferenzierung der Pläne über identische Objektpunkte treten Abweichungen von mehreren Dezimetern zu aktuellen Messungen auf.

Die meisten Planunterlagen der libanesischen Grabungen aus den 1960er Jahren sind mit einem Koordinatengitter versehen und erlauben somit eine geometrische Korrektur von Scan- und Papierverzug. Die Pläne wurden hierfür zunächst in kleinere Bereiche aufgeteilt, die dann getrennt über eine Affintransformation umgebildet und anschließend wieder zu einem Gesamtplan montiert wurden. Da über das in den Plänen vorhandene Koordinatensystem keine Informationen vorliegen, wurden die korrigierten Pläne schließlich über identische Objektgeometrien im aktuellen Koordinatensystem referenziert. In einzelnen Bereichen kommt es trotzdem zu Abweichungen von mehreren Dezimetern zu den aktuellen Messungen, die auf Probleme bei der ein-



heitlichen Erfassung der weitläufigen Grabungsareale mit den damals zur Verfügung stehenden Aufnahmemethoden hindeuten.

## 5 Rekonstruktion der spätosmanischen Stadt aus historischen Aufnahmen

Stadtentwicklung und Stadtumbauprozesse im ausgehenden 19. und frühen 20. Jahrhundert lassen sich mit Hilfe der frühen fotografischen Aufnahmen nachvollziehen.

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts produzierten verschiedene Fotostudios touristische Aufnahmen und zum Teil auch Stereobilder von Baalbek mit den Ruinen im Mittelpunkt (FANI 2005; BASTIAN 2007). Die älteste bekannte Fotografie mit einer Stadtansicht Baalbeks von 1855 stammt von Wilhelm Herford (FANI 2005; siehe Abb. 5). Die Aufnahme zeigt Baalbek von Südwesten, mit Wohnhäusern in der für die Dörfer der Beqaa typischen Bauweise mit flachen Lehmdächern (EL-KHOURY 1975, LEHMANN 2008). Fotografien aus der Zeit um die Jahrhundertwende, wie die Aufnahmen L. Burchhardts von 1897 (NIPPA 1996) oder die Messbilder A. Meydenbauers aus dem Jahre 1902, zeigen, wie sich der Charakter der Stadt verändert. Es entstehen zunehmend repräsentative Zentralhallenhäuser mit roten Ziegeldächern und die Stadt wird mit öffentlichen Bauten ausgestattet. Ein genauerer Blick auf die hoch aufgelösten Aufnahmen lässt sogar Neu- und Umbauprozesse einzelner Bauten erkennen. Damit können einerseits Informationen

zu heute nicht mehr vorhandenen Gebäuden gewonnen werden, andererseits sind die historischen Aufnahmen wichtige Quellen zur Bearbeitung des erhaltenen historischen Baubestandes.

Aufschluss über die noch bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts weitgehend intakte Altstadt von Baalbek geben auch Vertikal- und Schrägluftbilder (siehe Abb. 7), die im Rahmen von Aufklärungsflügen während und zwischen den Weltkriegen entstanden sind (CARMEL & EJAL 1999).

Durch vergleichende Analysen dieses Materials können Veränderungs- und Umbauprozesse, die zum Teil mit dem Abriss ganzer Stadtviertel einhergehen, nachvollzogen werden. Die photogrammetrische Auswertung des Bildmaterials ermöglicht, diese zerstörten Viertel für den historischen Stadtplan zu rekonstruieren. Aus der traditionell gewachsenen Struktur der Stadt können darüber hinaus Informationen zur antiken Stadt mit ihren Wasserleitungssystemen und Straßenverläufen abgeleitet werden. Die Basis zur Erstellung des historischen Stadtplans bildet ein Orthobildplan, der aus Vertikaltaufnahmen der 1930er und 40er Jahre berechnet wurde (siehe Abschnitt 6.2).

Ergänzende Informationen zur Stadtausdehnung und -struktur sowie zur Nutzung bestimmter Gebäude und Areale lassen sich aus der Messtischaufnahme G. Schumachers von 1904 gewinnen. Zusammen mit dem historischen Orthobildplan ist es damit möglich, einen historischen Stadtplan von 1904 geometrisch korrekt zu rekonstruieren.



**Abb. 5:** Wilhelm Herford, 1855: Stadtansicht von Baalbek (FANI 2005, S. 21).

## 6 Photogrammetrische Auswertung historischer Bilder

Photogrammetrische oder fotografische Aufnahmen liefern, neben *geometrischen* Informationen, vor allem eine *bildhafte* und zunächst *interpretationsfreie* Dokumentation der erfassten Objekte. Sie ermöglichen damit eine Auswertung auch zu einem späteren Zeitpunkt mit einer gegebenenfalls völlig neuen Fragestellung (siehe z.B. HEMMLEB 1999, WIEDEMANN 2000, VAN DEN HEUVEL 2001 oder BRÄUER-BURCHARDT & VOSS 2001). Auch für Baalbek existieren zahlreiche fotografische und photogrammetrische Dokumentationen aus mehr als 100 Jahren, die für eine inhaltliche und geometrische Analyse verwendet werden können.

### 6.1 Terrestrische Messbilder

Die Messbildaufnahmen aus der Zeit der ersten dt. Grabung zu Beginn des 20. Jahrhunderts befinden sich heute im Messbildarchiv des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege (BLDAM). Die Aufnahmen

wurden u. a. von Albrecht Meydenbauer eigenhändig angefertigt, der seinen Aufenthalt in Baalbek im Jahr 1902 als „in jeder Beziehung erfolgreiche und persönlich den Höhepunkt des Lebens bildende Reise“ bezeichnete (GRIMM 1977).

Neben Detailaufnahmen der Grabungen in der großen Tempelanlage wurden auch Stadtansichten Baalbeks in Form von Panoramen von erhöhten Standpunkten aus aufgenommen (siehe Abb. 6). Diese Aufnahmen liefern wichtige Informationen über den Stadtausbau und zur baulichen Gestaltung einzelner Gebäude am Beginn des 20. Jahrhunderts.

Da eine Digitalisierung der originalen Glasplatten nicht möglich ist, wurden Papierabzüge der in den 1980er Jahren erstellten Sicherungsverfilmungen bestellt. Für die geplante photogrammetrische Auswertung wurden diese mit einer Auflösung von 1000 dpi gescannt, wodurch sich jedoch drei Reproduktionsschritte mit z. T. unbekannter und nicht konstanter Abbildungsgeometrie ergeben. Auch aufgrund der sehr großen Aufnahmeentfernungen von mehreren hundert Metern sowie der ungünstigen geometrischen Konfigurationen – der nutzbare Bildbereich beschränkt



**Abb. 6:** Ausschnitt einer Messbildaufnahme Baalbeks von Albrecht Meydenbauer aus dem Jahr 1902 (Messbildarchiv beim BLDAM, Bild Nr. 2083-20).

sich zumeist auf einen schmalen Auswertehorizont entlang der Bildmitte – eignen sich diese Aufnahmen allein nicht bzw. nur eingeschränkt für eine photogrammetrische 3D-Rekonstruktion der historischen Stadtstruktur.

## 6.2 Historische Luftbilder

Die Grundlage für die Gewinnung von Stadtgeometrien bilden vielmehr die historischen Luftbilder aus dem Institut français du Proche – Orient (IFPO) Damaskus. Die Bilder zeigen die Stadt in mehreren Befliegungen zwischen 1933 und 1940 sowohl in klassischen Vertikal-aufnahmen mit entsprechender Überlappung, als auch in 30 Schrägaufnahmen (siehe Abb. 7).

Während die Schrägaufnahmen auf Glasplatten im Format  $13 \times 18$  cm vorliegen und damit eine hohe geometrische Stabilität aufweisen, befinden sich die  $18 \times 24$  cm großen Zelluloid-Negative der Vertikal-aufnahmen in

sehr schlechtem Zustand. Aufgrund der unsachgemäßen Lagerung sind die Filme stark verzogen/gekrümmt und weisen teils deutliche Schädigungen der Filmschicht auf. Sowohl die Glasplatten als auch die Zelluloidbilder konnten direkt vom Original gescannt werden, allerdings stand hierfür lediglich ein nicht kalibrierter, handelsüblicher Fotoscanner zur Verfügung. Die Aufnahmen wurden mit 600 dpi gescannt, eine höhere Auflösung erbrachte aufgrund des schlechten Zustandes der Filmschicht keinen Informationsgewinn.

Für die Orientierung und Auswertung der historischen Bilder wurden Passpunkte an zahlreichen, über das gesamte Stadtgebiet verteilten historischen Gebäuden sowie an den antiken Bauten tachymetrisch bestimmt. Die Berechnung von Orthobildern aus den Vertikal-aufnahmen erfolgte am Fachbereich Vermessungswesen/Kartographie der HTW Dresden unter Verwendung von ERDAS IMAGING zusammen mit Leica Photogrammetry Suite (LPS).



**Abb. 7:** Stadtansicht von Baalbek mit dem Jupiterheiligtum aus dem Jahr 1936, aufgenommen von Osten (© IFPO Damaskus, Nr. 20901).



## Orthobildgenerierung

Das für eine Orthobilderstellung benötigte digitale Geländemodell (DGM) wurde aus drei aktuellen Luftbildern aus dem Jahr 1996 erzeugt. Die auf Luftbildfilm vorliegenden S/W-Positiv-Aufnahmen einer Zeiss-Kamera RMK Top15 (WW, Brennweite 15 cm) mit bekannten Kameraparametern wurden mit einem kalibrierten Luftbildscanner digitalisiert. Bei einer Scanauflösung von 2540 dpi im Bildmaßstab 1:10.000 beträgt damit die Bodenauflösung 10 cm. Die Bildorientierungen wurden durch Aerotriangulation mit LPS-Core bestimmt, indem ca. 30 Konturenpasspunkte manuell und weitere Verknüpfungspunkte mittels Bildkorrelation automatisch im Bildverband gemessen wurden. Die Genauigkeit von 15 cm in Lage und Höhe nach der Bündelblockausgleichung entspricht der Definitionsgenauigkeit der tachymetrisch gemessenen Passpunkte im Bild und kann in dieser Größenordnung auch für die Folgeprodukte DGM und Orthobilder veranschlagt werden.

Für die DGM-Erzeugung mit LPS-ATE (Automatic Terrain Extraction) wurden zunächst automatisch 3D-Geländepunkte mit einem Abstand von 50 m generiert. Über spezielle Strategieparameter kann die Bildkorrelation in Abhängigkeit vom Geländetyp (rolling hills) und der Topografie (low urban) bedingt gesteuert werden. Anschließend ist es jedoch notwendig, diese Punkte mit LPS-TE (Terrain Editor) stereoskopisch zu kontrollie-

ren und flächenhaft oder einzeln zu editieren. Bei der dichten Bebauung im Stadtzentrum von Baalbek und der vielfältigen Vegetation am Stadtrand war ein hoher manueller Messaufwand in den Stereomodellen erforderlich. Es wurden vorhandene Punkte editiert, das Punktraster teilweise auf bis zu 10 m verdichtet und zahlreiche Bruchkanten (breaklines) an Geländeböschungen erfasst. Außerdem wurden die örtlich bestimmten Geländepunkte in das DGM integriert. Es kann davon ausgegangen werden, dass das aus den aktuellen Luftbildern erzeugte DGM wesentlich genauer ist als das bisher verwendete, aus digitalisierten Höhenlinien einer TK 25 abgeleitete, Geländemodell, das stellenweise Höhenfehler bis zu 20 m aufweist. Außer für Orthobildberechnungen ist das DGM auch Grundlage für künftige 3D-Visualisierungen.

Das mit LPS-Ortho Resampling abgeleitete Orthobild (Auflösung 0,2 Meter, siehe Abb. 8 rechts) stimmt mit den Passpunkten überein und kann künftig im Vergleich mit den historischen Orthobildern als Referenzbild gelten.

Parallel zur Auswertung der 1996er Luftbilder wurden 16 Vertikaltaufnahmen aus dem Jahr 1937 sowie 6 Vertikaltaufnahmen aus dem Jahr 1940 in getrennten Blöcken analog mit LPS-Core orientiert. Bei einer Scanauflösung von 600 dpi im Bildmaßstab 1:2.500 beträgt die Bodenauflösung in diesen Bildern ebenfalls 10 cm. Für die historischen Luftbilder lagen keine Kalibrierungsdaten der verwendeten Kameras vor, so dass die Kamerakonstante



**Abb. 8:** Ausschnitt aus den Orthobildern von 1937 (links) und von 1996 (rechts).

nur geschätzt (Brennweite 36 cm) und als Näherungswert in die Berechnung eingeführt werden konnte. Anhand der abgebildeten Rahmenmarken konnte ein einheitliches Bildkoordinatensystem festgelegt werden.

Aufgrund der geometrischen Unsicherheit bei der Bildorientierung einerseits sowie der schlechten geometrischen Qualität der Bilder andererseits genügen die berechneten Kameraparameter (Kamerakonstante und Bildhauptpunktkoordinaten) als Ergebnis der Simultankalibrierung nicht dem Genauigkeitsanspruch einer Messkamera. Die unsystematischen Filmdeformationen, vor allem verursacht durch die unsachgemäße Lagerung, konnten nicht bestimmt und eliminiert werden. Sie sind die Hauptursache der Ungenauigkeiten bei der Bildorientierung und den daraus resultierenden Modelldeformationen. Die Standardabweichung an den verwendeten Passpunkten beträgt nach der Bündelausgleichung 0,5 m in der Lage und 2 m in der Höhe. Die schlechte Höhengenaugigkeit ist vor allem auf die lange Brennweite der Kamera und die im Vergleich dazu geringen Höhenunterschiede im Objektraum zurückzuführen.

Mit LPS-MosaikPro wurden aus den historischen Aufnahmen Orthobilder unter Verwendung des DGM von 1996 berechnet (siehe Abb. 8 links). Aufgrund der Ausgrabungen in

den 1960er Jahren sowie durch Straßenbautätigkeiten entspricht das aktuelle Geländemodell teilweise nicht der Geländeoberfläche zum Zeitpunkt der Aufnahmen. In diesen Bereichen treten zusätzliche Lageabweichungen in den historischen Orthobildern auf. Die Abweichungen zu den tachymetrisch bestimmten Gebäudegeometrien betragen in den mittleren Bildbereichen ca. 20 cm, in den Randbereichen bis zu 2 m.

Beim Mosaikieren zum Bildplan wird bei einer Längsüberdeckung von 60 Prozent eigentlich nur jedes zweite Bild benötigt. Werden alle Orthobilder einbezogen, kann auf die Randbereiche mit den größeren Lageabweichungen verzichtet werden. Außerdem bleibt im breiteren Überlappungsbereich mehr Spielraum für die Definition der Schnittlinien. Diese können zwar automatisch generiert werden, meist führt jedoch eine manuelle Festlegung zu deutlich besseren Ergebnissen.

### Mehrbildauswertung

In einem letzten Schritt wurden die Schrägaufnahmen, zusammen mit ausgesuchten Vertikal-aufnahmen in einer gemeinsamen Bündelblockausgleichung mit dem für die Nahbereichsphotogrammetrie entwickelten Auswer-



**Abb. 9:** Mehrbildauswertung in den Schrägluftbildern (© IFPO Damaskus, Nr. 20876).



tesystem RolleiMetric CDW orientiert. Mit der großen Tempelanlage im Zentrum ergeben diese Aufnahmen einen Rundumverband und eignen sich daher sehr gut für eine nachträgliche Mehrbildauswertung. Die Aufnahmen stammen offensichtlich aus mehreren Befelegungen, ein einheitliches Rahmenmarkensystem ist nur für wenige Bilder auszumachen, in einigen Bildern fehlt es gänzlich. Aus diesem Grund erfolgte für die meisten Schrägaufnahmen eine bildabhängige Bestimmung von Hauptpunkt und Kamerakonstante. Die Standardabweichung für die Bestimmung eines Neupunktes innerhalb des Auswertebereiches liegt unterhalb 10 cm, was durch den Vergleich mit den tachymetrischen Messungen bestätigt wird. Für die manuell gemessenen Bildkoordinaten ergeben sich mittlere Verbesserungen von 0,03 mm was bei einer Auflösung von 600 dpi etwa einem  $\frac{3}{4}$  Pixel entspricht.

Im Rahmen einer kombinierten Auswertung soll ein 3D Stadtmodell entstehen, das den Zustand Baalbeks zu Beginn des 20. Jahrhunderts zeigt. Dafür wurden zunächst Grundrissinformationen zu Gebäuden aus den Orthobildplänen digitalisiert, die dann durch 3D Geometrien aus der Mehrbildauswertung der Schrägluftbilder ergänzt und korrigiert

wurden (siehe Abb. 9). Für einzelne Gebäude sollen schließlich aus den Schrägluftbildern sowie aus den terrestrischen Meydenbauer-Bildern zusätzlich detailliertere Informationen zur Typologie und Fassadengestaltung der Gebäude gewonnen werden. Die jeweiligen Bildausschnitte werden hierfür über die entsprechenden Fassadengeometrien entzerrt und als maßstäbliche Bildpläne den Gebäuden zugeordnet. Eine Texturierung der Gebäude mit den historischen Bildinformationen soll nicht erfolgen, da die Qualität des Bildmaterials zu unterschiedlich ist und bei weitem nicht alle Fassaden vollständig in den Bildern erfasst sind.

## 7 Erste Ergebnisse und künftige Arbeiten

Durch die Auswertung des historischen Bild- und Kartenmaterials konnte ein digitaler Stadtplan Baalbeks zu Beginn des 20. Jahrhunderts erstellt werden, der die Grundlage für die weiteren Untersuchungen zur Stadtentwicklung bildet. In diesem Stadtplan sind die Grundrissgeometrien von Gebäuden mit ihren Dachformen sowie sonstige Bauten als Vek-



**Abb. 10:** 3D Stadtmodell als Ergebnis der Mehrbildauswertung der historischen Schrägluftbilder für den in Abb. 8 gezeigten Ausschnitt.

tordaten erfasst. Die Sach- und Geometriedaten sowie zusätzliche Dokumente und Bilder zu den Gebäuden werden in einem speziellen Fachmodul innerhalb des webbasierten Geoinformationssystems CISAR (HENZE et al 2008; HENZE & MÖNCKE, 2008) gehalten. Alle Projektmitarbeiter haben hierüber Zugriff auf die aktuellen Forschungsergebnisse der einzelnen Teilprojekte. Über ein WebGIS werden neben den 2D Gebäudegeometrien auch die Geometriedaten anderer fachspezifischer Datenbankmodule (Fund-, Survey-, Bauteil-Modul), sowie die Orthobildpläne für die verschiedenen Befliegungen und weitere Rasterdaten bereitgestellt.

Anhand der aus den Schrägluftbildern erstellten 3D Gebäudegeometrien soll nun untersucht werden, welche Möglichkeiten 3D Stadtmodelle für die Forschungen zur Stadtentwicklung bieten. Im Vordergrund stehen dabei zunächst Fragen nach den verwendeten Technologien für die Modellierung, Speicherung, Visualisierung und Weitergabe der 3D Daten. Im Rahmen einer Diplomarbeit an der HTW Dresden wurde hierfür zunächst ein Stadtmodell (siehe Abb. 10) für das ausgewertete Gebiet mit LandXplorer ([www.3dgeo.de](http://www.3dgeo.de)) erstellt und als CityGML-Modell exportiert. Weitere Untersuchungen sollen nun klären, wie sich diese Daten in das bestehende Geoinformationssystem, basierend auf PostgreSQL/PostGIS sowie UMN MapServer und Mapbender, integrieren lassen und dort für die Forschungsarbeiten genutzt werden können.

## 8 Zusammenfassung und Bewertung

Historische Aufnahmen haben einen unschätzbaren Wert, wenn es darum geht, Wissen über heute verloren gegangene Substanz kulturellen Erbes zu erlangen. Die Erfahrungen des Baalbek-Projektes zeigen, dass es zur Auswertung und Weiterverarbeitung des historischen Bild- und Kartenmaterials kein Patentrezept gibt, sondern der Umgang mit den Daten von verschiedenen Parametern beeinflusst wird. Ob sich Fotografien oder Plandarstellungen geometrisch auswerten lassen, hängt zum einen von den vorhandenen Informationen zur Entstehung der Abbildungen ab.

Zum anderen spielen der Erhaltungszustand und die geometrische Qualität der Aufnahmen bzw. der zur Verfügung stehenden Reproduktionen eine entscheidende Rolle. In Abhängigkeit von der jeweiligen wissenschaftlichen Fragestellung muss abgewogen werden, ob die historischen Darstellungen den Genauigkeitsanforderungen für die Gewinnung metrischer Informationen genügen und ob der Aufwand für eine solche Auswertung in einem vertretbaren Verhältnis zum Ergebnis steht.

Für Baalbek lassen sich aus dem umfangreichen historischen Bildmaterial Informationen zur modern überformten traditionellen Stadtstruktur und zum historischen Baubestand gewinnen. Je nach Ausgangslage werden dafür verschiedene photogrammetrische Auswerteverfahren kombiniert angewendet oder vergleichende Bildanalysen vorgenommen. Zusammen mit der inhaltlichen und geometrischen Auswertung des Bild- und Planmaterials aus Altgrabungen ist es möglich, heute unwiderruflich zerstörte Stadt- und Grabungsbefunde für aktuelle Fragestellungen zu analysieren. Das historische Material trägt auf vielfältige Weise immer dann zur Klärung der Stadtentwicklung Baalbeks bei, wenn die Untersuchung des Originalbefundes nicht mehr möglich ist.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Labors für Photogrammetrie und Fernerkundung der HTW Dresden für die engagierte Zusammenarbeit bei der Auswertung der historischen Luftbilder. Besonderer Dank gilt dabei den Studenten Matthias Geßner und Lukas Dittel, die mit ihren sehr guten Arbeiten zur Bildorientierung und -auswertung wichtige Grundlagen für die Stadtforschungen in Baalbek geliefert haben.

Ebenso danken wir den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Labors für Geoinformatik der HTW Dresden für die aufwendigen Arbeiten zur Entwicklung von WebGIS-Funktionalitäten für das Informationssystem CISAR.

## Literatur

- AMBRASEYS, N.N. & BARAZANGI, M., 1989: The 1759 Earthquake in the Bekaa Valley: Implications for Earthquake Hazard Assessment in the Eastern Mediterranean Region. – *Journal of geophysical research* **94** (B4) 04/1989: 4007–4013.
- BASTIAN, H. (Hrsg.), 2007: Fragmente zur Melancholie- Bilder aus dem ersten Jahrhundert der Fotografie. – Hatje Cantz Verlag, Ostfildern.
- BRÄUER-BURCHARDT, C. & VOSS, K., 2001: Facade Reconstruction of Destroyed Buildings Using Historical Photographs. – XVIII. International Symposium CIPA 2001: 543–550.
- CARMEL, A. & EJAL, J.E., 1999: Der Kaiser reist ins heilige Land: Die Palästina-reise Wilhelms II. 1898. – *Abhandlungen des Gottlieb Schumacher Instituts Haifa*, Stuttgart.
- COLLART, P. & COUPEL, P., 1951: L'autel monumental de Baalbek. – Paris.
- COLLART, P. & COUPEL, P., 1977: Le petit Autel de Baalbek. – Paris.
- DEBBAS, F., 2000: Archéologie et photographie au Liban (1840-1918). – *Archaeology & History in Lebanon*, **12**.
- DEUMLICH, F. & STAIGER, R., 2002: Instrumentenkunde der Vermessungstechnik. – Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- VAN ESS, M. & WEBER, T., 1999 (Hrsg.): Baalbek. Im Bann römischer Monumentalarchitektur. – Verlag Philipp von Zabern, Mainz.
- VAN ESS, M., 2003: Archaeological research in Baalbek. A preliminary report on the 2001–2003 seasons. – *Bulletin d'archéologie et d'architecture libanaises VII*, Ministère de la Culture, Direction Général des Antiquités, Beyrouth, Liban: 109–144.
- VAN ESS, M. & RHEIDT, K., 2005: Archaeological research in Baalbek. A preliminary report on the 2004 and 2005 seasons. – *Bulletin d'archéologie et d'architecture libanaises IX*, Ministère de la Culture, Direction Général des Antiquités, Beyrouth, Liban: 117–146.
- VAN ESS, M., 2008 (Hrsg.): Baalbek/Heliopolis. Results of Archaeological and Architectural Research 2002–2005. – *Bulletin d'archéologie et d'architecture libanaises*, Hors-Série IV, Ministère de la Culture, Direction Général des Antiquités, Beyrouth, Liban.
- FANI, M., 2005: Une histoire de la photographie au Liban: 1840–1944. – Éd. de l'Escalier, Beyrouth.
- GRIMM, A., 1977: 120 Jahre Photogrammetrie in Deutschland – Das Tagebuch von Albrecht Meydenbauer. – Deutsches Museum. *Abhandlungen und Berichte* 45/1977 **2**, München.
- HEMMLER, M., 1999: Digital Rectification of historical images. – XVII CIPA Symposium 'Mapping and Preservation for the New Millennium'.
- HENZE, F., LEHMANN, H. & LANGER, W., 2008: CISAR – A Modular Database System as a Basis for Analysis and Documentation of Spatial Information. – 35<sup>th</sup> Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA), im Druck.
- HENZE, F. & MÖNICKE, T., 2008: A Distributed GIS Architecture for Research in Baalbek Based on CISAR. – 35<sup>th</sup> Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA), im Druck.
- VAN DEN HEUVEL, F.A., 2001: Reconstruction from a Single Architectural Image from the Meydenbauer Archive. – XVIII. International Symposium of CIPA 2001: 699–706.
- KEDAR, B.Z., 1999: The changing land between the Jordan and the sea: aerial photographs from 1917 to the present. – Yad Ben-Zvi Press, Jerusalem.
- EL-KHOURY, F., 1975: Domestic architecture in the Lebanon. – *Art and Archaeology Research Papers*, Juni 1975: 1–25.
- LEHMANN, H., 2008: Das ländliche Wohnhaus der Beqaa im städtischen Kontext. Das Stadtviertel Hay aš-Solh in Baalbek, Libanon. – *Forschen Bauen & Erhalten – Jahrbuch 2008/2009*, Verlag Westkreuz, Berlin: 84–97.
- MEYER, R., 1985: Albrecht Meydenbauer, Baukunst in historischen Fotografien. – VEB Fotokinoverlag Leipzig.
- NIPPA, A., 1996: Lesen in alten Photographien aus Baalbek. – *Völkerkundemuseum der Universität Zürich*.
- ROBERTS, D. & CROLY, G. (Hrsg.) 1843: The Holy Land. Syria, Idumea, Arabia, Egypt et Nubia. – London.
- VOLNEY, C., 1787: Voyage en Egypte et Syrie etc. – Paris.
- WIEDEMANN, A., 2000: Photogrammetrische Rekonstruktion zerstörter Bauten aus historischen Photographien. – *Vorträge der 20. DGPF Jahrestagung*: 23–31.
- WIEGAND, T. (Hrsg.), 1921/1923/1925: Baalbek: Ergebnisse der Ausgrabungen und Untersuchungen in den Jahren 1898 bis 1905. – de Gruyter, Berlin & Leipzig **1–3**.
- WOOD, R., 1757: The Ruins of Baalbec, otherwise Heliopolis in Coelosyria. – London.

## Anschriften der Autoren:

Dipl.-Ing. FRANK HENZE, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl für Vermessungskunde, D-03046 Cottbus, Tel.: +49-355-69-2439, Fax: +49-355-69-3490, e-mail: frank.henze@tu-cottbus.de

Dipl.-Ing. HEIKE LEHMANN, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl für Baugeschichte, D-03046 Cottbus, Tel.: +49-355-

69-4672, Fax: +49-355-69-2984, e-mail: heike.lehmann@tu-cottbus.de

Dipl.-Ing. BETTINA BRUSCHKE, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH), Labor für Photogrammetrie und Fernerkundung, Tel.: +49-351-462-3169, e-mail: bruschke@htw-dresden.de

Manuskript eingereicht: Dezember 2008

Angenommen: Januar 2009

# The Aerial Imagery of World War One: A Unique Source for Conflict and Landscape Archaeology

BIRGER STICHELBAUT & JEAN BOURGEOIS, Ghent, Belgium

**Keywords:** Historical aerial photography, conflict archaeology, World War One

**Summary:** During World War One, for the first time, aerial photography rapidly developed as an intelligence tool that saw large-scale application by all fighting nations. Large numbers of these photographs have survived in archives all over Europe, the United States and even Australia. These are a remarkable primary record of the progress of World War One, as well as being a unique record of the landscape at the beginning of the 20th century, and a valuable source of data for any archaeologist, landscape historian or cultural resource manager. This paper briefly describes the results of a large-scale archival research project that has created a GIS-based index to the geographical coverage of this imagery, supported by a quantification and characterisation of these collections. In addition to the overview of the archives, a large case study is presented herein which illustrates the potential application of this material in archaeology.

**Zusammenfassung:** *Die Luftbilder des ersten Weltkrieges: Eine einzigartige Quelle für Konflikt- und Landschaftsarchäologie.* Während des Ersten Weltkrieges entwickelten sich erstmals Luftaufnahmen zu einem Mittel der militärischen Aufklärung, welches von allen beteiligten Nationen rasch in großem Umfang genutzt wurde. Eine große Anzahl dieser Bilder sind noch heute in Archiven in ganz Europa, den Vereinigten Staaten von Amerika und sogar Australien zu finden. Diese Fotografien sind zum einen bedeutende Zeugnisse, die den Verlauf des Ersten Weltkrieges dokumentieren, zum anderen halten sie auf einzigartige Weise die Gegebenheiten der Landschaft zu Beginn des 20. Jahrhunderts fest und stellen so eine wertvolle Quelle für jeden Archäologen, Landschaftshistoriker oder Kulturschützer dar. Dieser Artikel beschreibt kurz die Ergebnisse eines weitreichenden Forschungsprojektes in Archiven, in dessen Rahmen ein auf einem Geo-Informationssystem (GIS) basierendes Verzeichnis über die geographische Verteilung der Bilder entstand. Hierbei wurde eine Quantifizierung und Charakterisierung dieser bildlichen Sammlungen durchgeführt. Neben einer Übersicht über die Archive wird außerdem eine umfassende Fallstudie präsentiert, in der eine potentielle Anwendung des bildlichen Materials sowohl in der traditionellen als auch in der Konflikt-Archäologie gezeigt wird.

---

## 1 Introduction

Following the First Battle of the Marne (5<sup>th</sup> to 11<sup>th</sup> September 1914), the character of World War One changed from a mobile war to a standstill in the trenches. Thus, both the strength and potential of the new weapon in the air were soon recognised. Before long, pilots and observers became the new eyes of the

army, a role previously held only by the cavalry and espionage (CARLIER 1921). Progress was made on both the technical aspects of aerial photography and the art of interpreting photographs taken from the air.

From the end of 1915 onwards, along the Western Front, photo-reconnaissance units were sent out on a regular basis for different purposes, but mainly to record the line of the



enemy's defences. Most aerial photography was aimed at the first lines or positions of defence, although a lot of strategic missions were carried out to gather information from far behind enemy lines.

Aerial reconnaissance work on the Western Front was conducted by various nationalities. The resulting, almost industrial, products, collected over four years, survived in large quantities and archival collections are spread throughout Europe, the United States and Australia.

In many archaeological papers, the importance of the Great War as regards the development of aerial photography is often acknowledged, but without going into too much detail (BEWLEY 2005). This is rather curious since the father of archaeological aerial photography, O.G.S CRAWFORD, was engaged in photographic reconnaissance missions along the Western Front in France and Belgium (CRAWFORD 1955). In the inter-war period, he subsequently used his experience to convert aerial photography into a standard archaeological prospection method, and even announced that "*the invention of aerial photography would be to archaeology what the invention of the telescope was to astronomy*" (CRAWFORD quoted in HAUSER 2008). Furthermore, aerial reconnaissance during World War One has always been overshadowed by – in the eyes of the public – the heroic battles involving fighter pilots such as Ball, Guynemer or von Richthofen. Until recently (see, e.g., FINNEGAN 2006), World War One aerial reconnaissance has rarely been studied in its entirety.

No one ever considered looking at the overall picture of what aerial photographs have preserved, mainly because, until recently, the images have only been used as illustrations rather than as a primary source. Consequently, the archives contain hidden potential, or, as Bewley and Raczkowski put it: "*Unlocking these (hidden) archives is perhaps the single most important development which would dramatically improve our understanding and knowledge of Europe's historical environment*" (BEWLEY & RACZKOWSKI 2002).

The research goals of this paper are diverse. First of all, the archival aspect of these forgotten resources will be explored to illustrate which aerial photographic collections have

been preserved, in what quantities, and covering which regions of the Western Front. Secondly, different possible applications for the images are further explored in brief. Finally, a large case study in West Flanders (Belgium) is presented to illustrate what information can be collected by using a huge number of georectified historical aerial photographs as a means of contributing to the rapidly evolving field of conflict archaeology.

By unlocking different collections and illustrating their wide distribution and possible applications all over Europe, we hope to highlight the huge potential of these aerial photographs for authors in diverse research topics.

## 2 Large-scale Archival Research

If we consider the use of the images as a primary source for various disciplines, the importance of the archival aspect should be emphasised. Scholars wishing to study a particular area need to be aware that these collections are scattered among archives and museums. Understanding the principal goal of aerial photography – to gather intelligence about the enemy – indicates the need for a multi-archival approach, especially if the aim is to comprehend larger regions rather than particular sites.

A survey of accessible collections of aerial photographs dating from World War One has revealed that many have been forgotten or hidden away in filing cabinets – literally hundreds of thousands of pictures have survived. For the most part unaffected by the ravages of time, they are currently kept in miscellaneous archives. The large numbers of preserved pictures are astonishing and allude to the real importance of aerial photography during World War One. This is perhaps best illustrated in popular magazines published shortly after the conflict, such as *Popular Mechanics*, in which aerial photographs (and their interpretation beneath a stereoscope) are even described as the "*deadliest weapon of the war*" (FINNEGAN 2006).

The collections which have been studied are briefly summarised with particular mention being made to the diverse methods used to reference and catalogue them.

### Belgian Royal Army Museum

The 'Collection Photos Aériennes '14-'18' (Aerial Photo Collection '14-'18'), stored at the Belgian Royal Army Museum, is the largest in Belgium. The majority of the aerial photos were taken by the Aviation Militaire Belge (AvMB), or the Belgian Military Aviation during World War One. As a consequence, the distribution of the photographs is broadly limited to the area between Nieuwpoort (Belgium) and the northern part of the Ypres salient, the front held by the Belgian army.

### Imperial War Museum

The aerial photo collection in the Imperial War Museum (IWM) is referred to as the 'Box Collection' and (before the detailed archival research) was said to hold more than 80,000 glass-plate negatives of 1914–1918 aerial photographs (IWM 2007, WATKIS 1999). The collection is accessible through a card-index drawer which is keyed to the GSGS (Geographical Section of the War Office General Staff) sheet numbers of the 1:40,000 series of trench maps. Because of their tactical and strategic use, the maps were provided with a reference grid (24 squares by 6,000 yards wide) allowing the accurate positioning of structures. This exact grid is still in use at the IWM to classify the pictures by year and location. The entire collection was quantified by counting the aerial photographs on the index cards. This resulted in an estimated 133,288 unique glass-plate negatives of vertical aerial photos (1915: 2,472; 1916: 14,001; 1917: 52,737; 1918: 64,078) covering France and Belgium. This number is significantly higher than the numbers put forward by the IWM (2007) and WATKIS (1999) and underlines the need for detailed archival research.

### Australian War Memorial

Few researchers are aware of the existence of the major collection of historical aerial photographs at the Australian War Memorial (AWM) in Australia. This collection had already been compiled during the war and in the 1920s by the Australian War Records Section to document the Australian battlefields. The collection, which contains 16,030 aerial photographs, is accessible in the same way as the Imperial War Museum's 'Box Collection' –

that is, by means of the contemporary GSGS trench map sheet references.

### Bayerisches Hauptstaatsarchiv

The only still existing sizeable German aerial photographic collection was found at the Bayerisches-Hauptstaatsarchiv (Abteilung 4: Kriegsrarchiv): the 'BS-Aufklärung' (Photo-reconnaissance Collection). A. Fuchs, the former director of the archives, states that: "*one can hardly estimate the number of aerial reconnaissance pictures*" and also "*the number of photos is in the six figures*" (FUCHS 2000). The collection contains approximately 300,000 printed aerial photographs, catalogued by unit (mainly Bavarian *Fliegerabteilungen*) which took the aerial photographs. The 'BS-Aufklärung' is only described to a certain degree in the collection's finding aid. This document describes the most prominently photographed place names and indicates the core of the geographic distribution of what remains of German aerial photographs. It consists of 127 large box files, each containing huge numbers of aerial photos. The aerial coverage relates mainly to Belgium and France. For a detailed overview of other German collections, we refer to the research of P. Haupt (HAUPT 2009).

### US National Archives

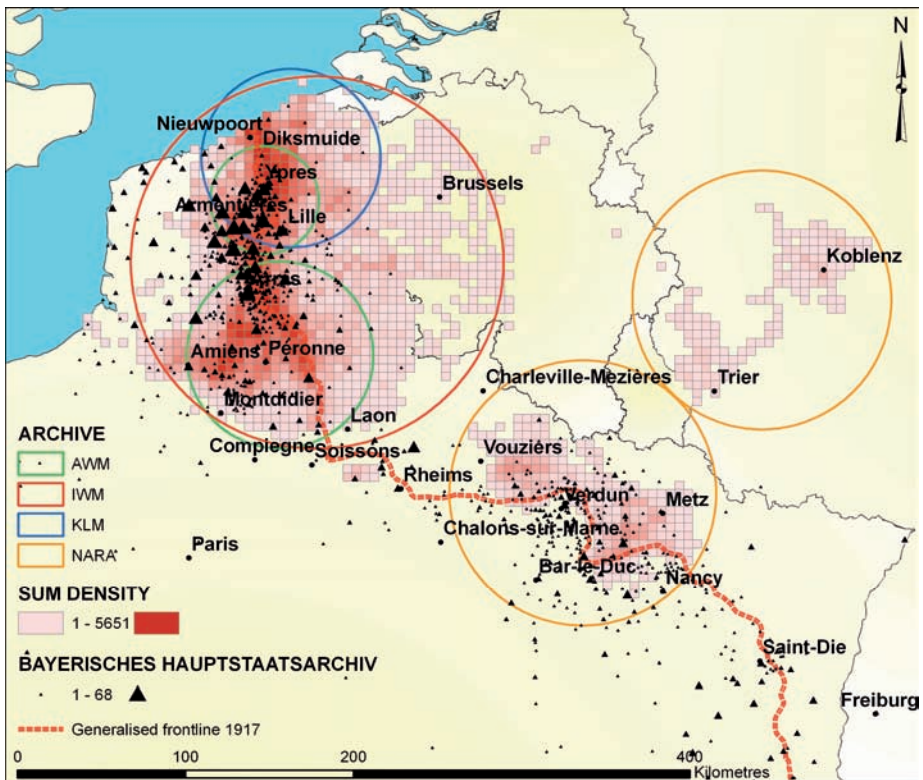
A collection of World War One aerial photographs can also be found at the US National Archives and Records Administration. The guide to the archives (MATCHETTE 1995) refers to the records of the American Expeditionary Forces (AEF) as Record Group 120. Within the records of the 2<sup>nd</sup> Section of the General Staff (GHQ AEF), Intelligence Section, an aerial photographic collection is briefly described as "*American, French, and some German aerial photographs and index maps relating to the Western Front, 1917–19 (16,291 items)*" (NARA 2008). These aerial photographs date from 1918 (the battle of St Mihiels and the Meuse-Argonne offensive) and 1919 (US occupation of the Rhineland and some of the former 1918 battlefields).

### Archival patchwork

In order to gain a full understanding of this archival patchwork of aerial coverage, one major goal was to shed light on the combined

**Tab. 1:** Summary of aerial photographic collections.

	Number of archived aerial photographs
Belgian Royal Army Museum	48,511
Imperial War Museum	133,288
Australian War Memorial	16,030
Bayerisches Hauptstaatsarchiv	approx. 300,000
US National Archives	16,291

**Fig. 1:** Archival study of World War One collections of aerial photographs.

geographic coverage of all major aerial photography collections. This very useful tool enables users to determine which archives are of interest for particular areas in Europe. The aerial coverage of the collections has been indicated on a basic map of Europe, not only to give an idea of how these sources were dispersed throughout Europe but, where possible, to identify blind spots and hot zones to enable a realistic assessment of future research zones for a variety of disciplines.

The outcome was astonishing because the quantities of aerial photos preserved are enormous and much more consolidated than was expected. Several hundreds of thousands pictures could be tracked (cf. Tab. 1) in collections which form an archival patchwork of aerial coverage. Some archives have unique aerial photos for certain areas, while others overlap to a large extent. Although the overall picture has yet to be studied, in our opinion such an approach is essential for any further

research because it allows users to locate and identify specific aerial photographic coverage. All data has been transferred into the classification system used at the Australian War Memorial and Imperial War Museum because this forms a regular grid based on the GSGS trench map-referencing method.

The combination of this huge amount of information extracted by means of archival research all over the world, gives an unparalleled view of the availability of aerial photos. Immediately, three clusters can be observed (cf. Fig. 1). The first and largest group stretches from the North Sea in Belgium to Montdidier (France). This cluster comprises photographs of both warring parties, although the gravity point of the German pictures lies in the centre between Armentières and Arras (France). The shifting of the front lines during the war can be seen clearly on the grid. An additional remark concerns the situation of the German point locations on the western side of the front lines, while the Allied picture seems to focus on a larger area on both sides of the front line. Briefly, this cluster covers the western part of Belgium and the French regions of Nord-Pas-de-Calais and Picardy. The second cluster is mainly located in the Lorraine with some very limited coverage in the neighbouring regions (Champagne-Ardenne, Franche-Compte and Alsace). These areas are only covered by German and American aerial photos. The eastern limit of the cluster is only covered in German boxes of aerial photos. The third group of aerial photographs is American and is located in the Rhineland.

Equally important are the areas where aerial coverage is lacking. It is noticeable that there is somewhat of a gap between the largest clusters between Compiègne and Vouzières (France). Both the Allied and German collections focus on other areas. This gap is linked to the absence of Bavarian army operations in the region; the collections of other German armies which were active in these areas were destroyed during Allied bombardments in World War Two. From the Allied point of view, the French front line ran from the Somme to the east. Since the French aerial photo collections are very dispersed and thus inaccessible (BEYLOT 2009), these areas can be considered as empty zones.

### 3 Application of the Sources: 'The First 30 Kilometres – Nieuwpoort to Houthulst Forest (Belgium)'

#### 3.1 Introduction

The aerial photographs are a storehouse of information for the study of past landscapes and, as such, can be used for a variety of applications. A first and important application of these aerial photos is that they enable the detection of previously unknown archaeological sites. Artillery fire destroyed the parcelling and drainage in the field systems at the front. This, combined with the deliberate flooding of some rivers for strategic purposes, provided the ideal (humid) conditions for the detection of watermarks and earthworks. Literally hundreds of unknown medieval moated sites can be detected. For instance, in the centre of an aerial image (cf. Fig. 2), an excellent example of a previously undetected archaeological site can be observed as a large circular earthwork (watermark). In addition, many war features, such as trenches and barbed-wire obstacles, are visible on the photograph.

By examining aerial photos, it becomes quite apparent that most of the visible features are of a more recent nature and are connected to the Great War. They depict an industrialised war landscape from the North Sea in Flanders to the French-Swiss border. Two lines of field defences can be seen, divided only by a narrow stretch of land: no-man's-land. When we focus on the zones further away from the front line, we can see trenches providing places for artillery zones, embedded with gun pits and camouflaged positions. In addition, barracks, railways, ammunition dumps, wireless signalling sites, hospitals, railway stations and aerodromes make up the largest part of the visible features.

This brings us to the third and largest application of these aerial images for modern scholars: researching the war landscape by combining early aerial imagery and GIS. Because of the abundance of these resources, it is possible to study multiple front sectors at the same time, rather than being restricted to a site-oriented approach. By using GIS, all the relevant war features can be re-mapped on to







thousands of images which are needed to re-search an entire sector.

The choice of GCPs is crucial to the success of the georectification of aerial photos. This cannot be stressed enough when using historical aerial photos because there is a problem which might arise sometimes. At the heart of this matter is the large time lag between the shooting of the pictures and the reference maps used (scanned cadastral maps from 1997, with an accuracy of 1–5 metres to the 1 : 10,000 topographical map). This is made even more difficult because the images are located in a landscape where an industrialised war was fought. Artillery bombardments destroyed large parts of the landscape and field boundaries.

A high density of aerial coverage is particularly important for a comparative study of the aerial photographs. Although a lot of information can be retrieved from a single aerial photograph, much more can be retrieved by comparing multiple images. It is only when different pictures are compared that minor changes can be detected that give us detailed information on the nature, organisation and meaning of certain traces.

In addition to the comparative method, many aerial photographs have been studied using stereoscopy. In the large collections of historical images which were analysed, it is possible to find stereo pairs which were deliberately taken for stereo purposes. The intensity of the photo-reconnaissance missions from 1915 onwards, on both the Allied and German sides, forced the ground troops to conceal their field positions and intentions from aerial observation. To counter this ongoing war between aerial interpreters and the ground troops, a new technique was developed called stereoscopy. The invention of this was not new in World War One – the innovative aspect was the adaption of the method to aerial photography. The GIS and remote-sensing software package ILWIS 3.4 was used to create anaglyphs which were successfully integrated into the interpretation process.

Having interpreted the aerial photographs, all relevant traces of both traditional and conflict archaeology were digitised on screen as detailed polygons and dated as accurately as possible.

### 3.3 Results

The detailed study and interpretation of aerial photographs in the research area of 443 km<sup>2</sup> resulted in an inventory of 26,987 features of traditional and conflict archaeology (cf. Fig. 3). A selection of features has been discussed in order to analyse the structure, organisation and layout of the Great War landscape in the study area. The intention is not to give a detailed analysis of all feature categories, but rather to point to the importance and applications of World War One aerial photography in the field of conflict archaeology.

Trenches, which are perhaps a symbol of positional warfare during World War One, make up a large part of the recorded features. Large numbers of these features were constructed on both sides of the no-man's-land. The length of these defensive fire trenches (both Allied and German) totalled 416.59 km and were connected with no less than 252.3 km of communication trenches. The contemporary field manuals (i. e., *Chef des Generalstabes des Feldheeres 1918*) give an indication on which types of trenches were built. When comparing the aerial photographs with these manuals, it becomes clear that the aerial photographs show many unknown (sometimes experimental) local variations. Each of the fire trenches has been interpreted and fitted into a newly developed typology of this feature. The frequency of the trench types clearly shows that most of the trenches were constructed with square traverses. The total length of such features amounted to 204.9 km. The second largest group comprised trenches with round traverses, but the length of these was significantly lower (82.04 km). A similar typology has been developed for communication trenches. The majority of these features (75.91 km) has a zigzag trace although communication trenches with a sinuous trace, a straight trace and trenches with a straight traversed trace were also popular features in the area studied, measuring 43.02 km, 39.34 km and 36.83 km, respectively. In particular, the high frequency of straight communication trenches was surprising, because this type was clearly disapproved of in field manuals.

Discussion of the different types of trenches makes it clear that there was a large diversity

of trenches in the area studied. The interesting thing is that some trenches only occurred occasionally (which is important for the cultural management of this heritage) and sometimes even in a specific context such as exercise trench systems. The temporal aspect of the inventory makes it possible to date some trench lines to a certain extent. Soon after the Battle of the IJzer, both parties started to entrench themselves into the area, separated only by

no-man's-land. In some areas, this stretch of land was wide (up to almost 2 km), while in other places Allied and German trenches were only 20 m apart. It is interesting to note that defensive positions were constructed with the same type of trenches. Trench lines with square traverses were made throughout the war, while trenches with semicircular traverses were chronologically earlier.

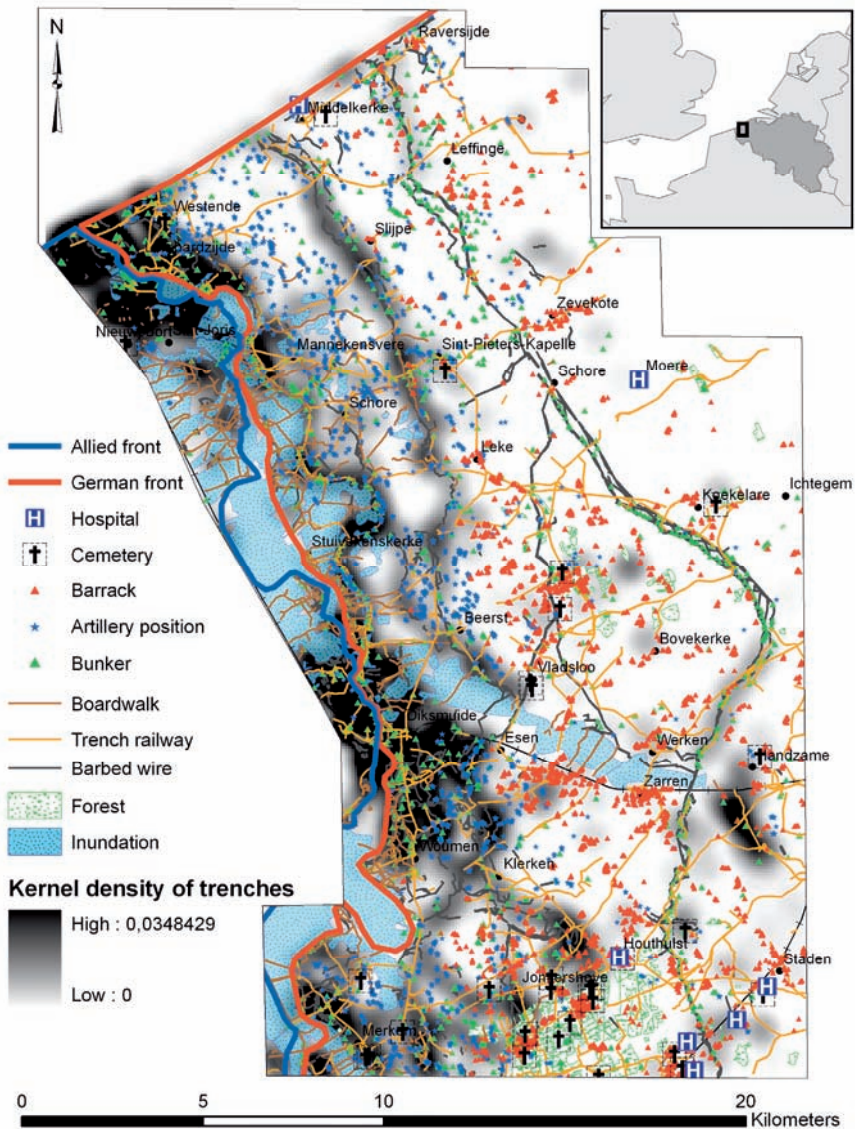


Fig. 3: Density and point distribution map of a selection of the recorded features.

Bunkers and barbed-wire entanglements were distributed in the front and rear areas. In both cases, they were arranged to form defensive positions. The entire defensive system consisted of lines of more than 1,700 bunkers with 510 km of barbed-wire entanglements in front of them. The early defensive positions consisted of a combination of trenches and bunkers. Later positions no longer included large numbers of trenches, reflecting the changing military doctrine.

Marshy landscapes covered with mud are an archetypal representation of the front lines. This generalisation is valid for a large part of the study area. Because of the inundation of the area between the IJzer River and the Diksmuide-Nieuwpoort railway, a large part of the landscape became practically inaccessible. To reach the outposts and advanced listening posts, situated on the higher ground in the flooded area, both sides constructed long wooden boardwalks (216.7 km) to connect them with the drier parts of the landscape. A network of narrow-gauge railways was constructed to facilitate the transportation of building materials (wood and concrete) and ammunition from the rear areas towards the front. Careful photographic interpretation reveals the complex nature of this network, which comprised 480.4 km of narrow-gauge railways in total. In many cases, these railways lead to the 2,680 artillery positions which were recorded. They also have a very diverse typology and are mainly situated between one and five kilometres from the front. Just behind this artillery area, 3,300 barracks have been identified. Their location was related to the presence of railways and woods, occurring mainly between four and nine kilometres from the Allied first line. In addition to barracks, there were seven hospital sites, also closely related to a railway, and clustered in the southern part of the front, closer to the more active front near Ypres where both armies suffered from higher casualties. Forty-two German war cemeteries were also observed, which is important because they have not been visible on the landscape since the 1930s, and in the 1950s were relocated into larger cemeteries in Langemark and Vlad-sloo.

The detailed analysis of the feature categories illustrates the individual character of smaller regions within the study area and the strong relationship between the network of military features and the landscape. For instance, the absence of a large trench density near the inundations, the location of defensive positions west of the villages, the construction of trenches with breast-works in the polders and wet area, the importance of strategic height for the location of trench lines, and the position of a large number of canvas screens on the flat polders to conceal troop movements from terrestrial observation can be quoted in this respect. It is also important to mention that the location of trench lines and the defensive positioning of bunkers was not always as might be expected when studying German war regulations. The aerial photographic interpretation shows that the real situation on the battlefield was often different to the "ideal battlefield" as described in the war manuals.

The overview and analysis of war features gives an idea of the distribution and density of features which were recorded on aerial photographs. Such an approach reveals how the Great War battlefield really was organised and where certain types of features were situated. Therefore, this kind of information and the maps provide a very useful tool for the cultural management of this type of heritage and the war landscape in Flanders.

## 4 Conclusions

A survey of accessible aerial photography collections in different countries has revealed the existence of sizeable collections from the Great War. Their existence is not widely distributed thus only a few specialised researchers have made use of these resources. We believe it is of the utmost importance to gain insight into these archival assets so that we can use these images in our methodologies. Rather than studying and discussing one collection, a brief overview of all the major collections is presented along with the distribution of their aerial coverage throughout Europe. By using GIS, it is possible to combine data from different sources into one layer of information. This layer indicates where, to what extent and in

which archives we can expect to find Great War aerial photos. We believe this provides research tools to locate specific aerial photographs from collections of several hundreds of thousands. These historical photos can be used for a variety of scientific applications, including the potential to detect 'new' but already destroyed archaeological sites, both as crop- and soil-marks. The pictures can reveal interesting information for historical geographers, such as, for example, land use, forestation, field systems, etc. The study of the Great War landscape and archaeological remains using GIS offers unique insights which cannot be achieved by means of other research methods. In some cases (such as isolated military features in the hinterland), aerial photos are the only resource available, while in other cases complementary information can be gathered using trench maps. But throughout all these examples we have the advantage of a bird's-eye view which provides a unique landscape-oriented research scale rather than a site-by-site approach.

## References

- BEWLEY, R., 2005: Aerial Archaeology. The First Century. – *Aerial Photography & Archaeology* 2003. A century of information, Academia Press, Ghent: 15–30.
- BEWLEY, R. & RACZKOWSKI, W., 2002: Future Development of Aerial archaeology. – *Aerial archaeology. Developing Future Practice*. NATO Science Series 337, IOS Press, Amsterdam: 1–8.
- BEYLOT, A., 2009: Military Aerial Photographs, from 1914 to the present. A survey of the French sources. – *Images of Conflict: Military aerial photography and archaeology*, Cambridge Scholars Publishing, Cambridge: 135–150.
- CARLIER, A., 1921 : La Photographie Aérienne pendant la Guerre. – Librairie Delagrave, Paris.
- CHEF DES GENERALSTABES DES FELDHEERES, 1918: Allgemeines über Stellungsbau. – Druckerei des Chef des Generalstabes des Feldheeres, S.L.
- CRAWFORD, O.G.S., 1955: Said and Done: the autobiography of an archaeologist. – Wiedenfeld, London.
- FINNEGAN, T.J., 2006: Shooting the front. – National Defence Intelligence College Press, Washington.
- FUCHS, A., 2000: The Bavarian War Archive in Munich. – *Over the Front* 15 (2).
- HAUPT, P., 2009: Great War Aerial Photographs in German Archives: a Guide to the Sources. – *Images of Conflict: Military aerial photography and archaeology*. – Cambridge Scholars Publishing, Cambridge: 151–164.
- HAUSER, K., 2008: Bloody Old Britain: O.G.S. Crawford and the archaeology of modern life. – Granta Books, London.
- IWM, 2007: Box Collection vertical photographic coverage (unpublished document). – Imperial War Museum, London.
- MATCHETTE, R., 1995: Guide to Federal Records in the National Archives of the United States. – National Archives and Records Administration, Washington DC.
- NARA, 2008: Web version based on Guide to Federal Records in the National Archives of the United States. Compiled by ROBERT B. MATCHETTE et al. Washington, DC: National Archives and Records Administration – [www.archives.gov/research/guide-fed-records/groups/120.html](http://www.archives.gov/research/guide-fed-records/groups/120.html) (6/02/2008).
- SAUNDERS, N., 2002: Excavating Memories: Archaeology and the Great War, 1914–2001 – *Antiquity* 76: 101–108.
- STICHELBAUT, B., DEVRIENDT, D., GOOSSENS, R. & BOURGEOIS, J., 2005: Reconstructing the past: the use of digital photogrammetry and GPS measurements for the study of the 1914–1918 wartime landscapes. – AARG Annual Conference, Leuven: 89.
- WATKIS, N., 1999: The Western Front from the Air. – Redwood Books, Wiltshire.

### Address of the Authors:

Dr. BIRGER STICHELBAUT and Prof. Dr. JEAN BOURGEOIS, Ghent University, Department of Archaeology and Ancient History of Europe, B-9000 Ghent. Tel.: +32-9-264-41-06, Fax +32-9-264-41-73, e-mail: birger.stichelbaut@ugent.be, jean.bourgeois@ugent.be

Manuskript eingereicht: Dezember 2008  
Angenommen: Februar 2009



# Rectification of Historic Royal Air Force Aerial Photos and Generation of an Aerial Image Mosaic of the Sarno River Basin, Italy

VOLKER HECK, Siegen & SEBASTIAN VOGEL, Berlin

**Keywords:** Rectification, georeferencing, Royal Air Force aerial photos, Sarno River basin

**Summary:** Within the geoarchaeological project “Reconstruction of the Ancient Cultural Landscape of the Sarno River Basin” a rectified high resolution aerial image mosaic of 1943 was generated to subsequently analyze ancient land fragmentation (centuriation). Because today the Sarno River basin is a highly urbanized and populated area, many landscape structures such as ancient roads, field boundaries or remains of the natural river network can be better verified on the historic photographs than on recent ones. Therefore Royal Air Force (RAF) aerial photographs from 1943 were rectified and georeferenced using recent digital Italian topographic maps on a scale of 1 : 25,000.

**Zusammenfassung:** *Entzerrung von historischen Luftbildern der Royal Air Force und Erstellung eines Luftbildmosaiks des Sarno-Beckens, Italien.* Innerhalb des geoarchäologischen Projektes „Rekonstruktion der antiken Kulturlandschaft des Sarno-Beckens“ wurde ein hoch aufgelöstes Luftbildmosaik von 1943 erstellt, anhand dessen später die antike römische Landeinteilung (Zenturiation) näher untersucht werden soll. Da das Sarno-Becken heute einen stark urbanisierten und dicht bevölkerten Raum darstellt, sind viele der alten Landschaftsstrukturen wie zum Beispiel antike Straßenverläufe, Flurgrenzen und Reste des natürlichen Flussnetzes auf den historischen Fotos besser zu verifizieren als auf heutigen. Aus diesem Grund wurden Luftbilder der Royal Air Force von 1943 mit Hilfe Italienischer topographischer Karten im Maßstab 1 : 25.000 entzerrt und georeferenziert.

---

## 1 Introduction

Until today the archaeological research activity of the Vesuvius region in Southern Italy was particularly focused on urban settlements like Pompeii, Nuceria and Stabiae. However the cities cannot be considered in isolation from their hinterland in which they were geographically, politically and culturally embedded and from which they were economically dependent. Consequently in the year 2006 the German Archaeological Institute initiated a geoarchaeological project which is entitled “The Reconstruction of the Ancient Cultural Landscape of the Sarno River Basin”.

The aim of this project is to expand the focus of research in the Vesuvius region from cities like Pompeii into the surrounding Sarno River basin by investigating the natural condi-

tions of this landscape and the anthropogenic influence in the Roman period. This project brings together scientists of different disciplines such as archaeologists, archaeobotanists, geographers and pedologists from different institutional and national backgrounds of Germany, Italy and Great Britain (SEILER 2007, 2008).

One important anthropogenic and political factor that influenced the spatial structure and organization of the Sarno River basin in Roman times was the ancient land fragmentation or the so-called centuriation. Some past research projects have already enabled the identification of relics of ancient land fragmentation by using present-day cartographic material and aerial photographs of the Sarno River basin. They show that in spite of time and volcanic eruptions ancient landscape structures



can be passed on over centuries. Volcanic dep-ositions directly blur or even erase many land-  
scape structures of an affected area. However  
due to the continuity of settlement in the re-  
spective territory those former structures of-  
ten re-emerge (CASTAGNOLI 1956, 1958; CHOU-  
QUER et al. 1987; SORICELLI 2001).

For the first time this past hypotheses on  
Roman centuriation are to be verified using  
aerial photographs of the Royal Air Force  
(RAF) from 1943 (National Aerial Photogra-  
phy Archive, Central Institute for Cataloguing  
and Documentation, Rome) to prospectively  
carry out a structural analysis of the landscape  
of the Sarno River basin by means of geo-  
graphic information systems (GIS) and remote  
sensing. This analysis will be based on a high  
resolution aerial image mosaic from 1943  
showing the rural landscape of the Sarno Riv-  
er basin before the last eruption of Somma-  
Vesuvius in March 1944 and the strong urban-  
isation process of the last 50 years.

## 2 Methodology

The generation of the aerial photo mosaic of  
the Sarno River basin to subsequently analyze  
ancient land fragmentation (centuriation) was  
carried out by rectification of historic RAF  
aerial photos of 1943 using present day topo-  
graphical maps (Italian Military Geographic  
Institute (IGM) 1:25,000). The RAF aerial  
photographs were of rather fair quality be-  
cause only scans of paper copies were avail-  
able for the restitution process. Furthermore  
the **photographic material was relatively inho-  
mogeneous** as the photos had different scales  
of approximately between 1:10,000 and  
1:30,000. In order to prepare the data in GIS  
and combine them with other available geo-  
graphical data especially from the local Italian  
authorities (e. g., Autorità di Bacino del Sarno,  
Soprintendenza Speciale per i Beni Archeo-  
logici di Napoli e Pompei) the Italian Gauss-  
Boaga-coordinate system was used.



**Fig. 1:** Example of an RAF aerial photograph of 1943. Note that only two fiducial marks are visible on the left and right hand side.



**Fig. 2:** Example of control points measured in both IGM map (left) and RAF aerial photograph (right) (screenshot from LISA software). Clearly to be seen is the different angle between the map and the photo and the distortion because of central perspective in the photograph before rectification.

The basis of the rectification of the RAF aerial photos were the following 8 sheets of the present day IGM map on a scale of 1:25,000: Pomigliano, Nola, Ercolano, Sarno, Torre del Greco, Nocera Inferiore, Sorrento and Amalfi. Therefore they were scanned and georeferenced by means of Gauss-Boaga coordinates given on the respective sheets.

The calculation of the RAF aerial photos could only be made by means of a simple two-dimensional instead of a true photogrammetric three-dimensional rectification since the scanning of the photos was not carried-out according to photogrammetric factors. Hence most of the images did only hold two or less fiducial marks as to be seen in Fig. 1.

In a first step the topographic maps as well as the aerial photographs were scanned. The scanning was carried out at 600 dpi. Because of the rather poor quality of these images no higher resolution was recommendable; hence a higher resolution would have caused a significant increase of noise. Digitizing the topographic maps (1:25,000) at a resolution of 600 dpi resulted in a pixel size of 1.05 meters. Amplification of the digital topographic maps produced a control point accuracy of 2 to 3

meters which can be assumed for the topographic maps as well as for the aerial photographs, reaching a scale of 1:25,000 on average. Having in mind noise and scanning artefacts and taking also into consideration the aspect of generalization the geometric resolution (pixelsize) was set to 2 meters.

The RAF aerial photographs were cut off, clipping the frame and the fiducial marks. Then the image data were imported into the operating software (LISA) and turned by approximately 90° in order to achieve a nearly northern orientation. Thus control points in both maps and photos could be identified more easily. These control points were the basis for the rectification process (cf. Fig. 2). 30 to 40 in particular cases even more control points were measured on each aerial photo. One has to take into consideration that the control points have to be well distributed to cover the whole area of a certain photograph (LINDER 2003). Every photo was rectified (x and y) by a plane affine transformation within the flat areas of the Sarno River basin whereas in the adjacent mountainous regions rubber-sheet stretching was used. Afterwards outliers were removed manually (HECK 2006). In a last step the recti-

fied RAF aerial photographs were assembled to an aerial image mosaic of the Sarno River basin of 1943.

### 3 Results

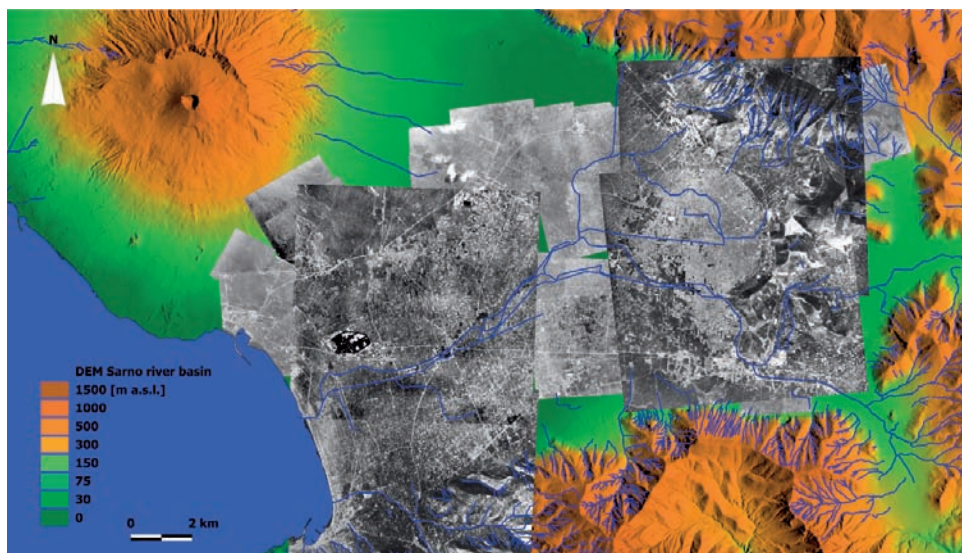
The obtained aerial image mosaic of the Sarno River basin 1943 (cf. Fig. 3) can provide important data for geoarchaeological landscape research because it shows the rural landscape of the Sarno River basin before the last eruption of Somma-Vesuvius 1944 as well as the vast urbanization process respectively.

The eruption of Somma-Vesuvius in March 1944 on one hand had a considerable impact especially on the northern and northwestern territory of the Sarno River basin due to depositions of ash and pumice falls as well as small pyroclastic flows. On the other hand nowadays the Sarno River basin is a highly urbanised and populated area. This urbanization process that particularly took place within the last 50 years has also erased many natural landscape structures. Consequently features like ancient roads, field boundaries or remains of the natural river network are expected to be much better and more reliable verified on the historic orthophotos than on recent ones. Fig. 4 illustrates the effect of this urbanization process in

terms of the consumed area exemplarily for a 40 km<sup>2</sup> sector around the excavations of Pompeii. On the RAF aerial photograph of 1943 (left) an area of 1.7 km<sup>2</sup> can be considered as urbanized, which is a total of 4.3%. On the aerial photograph of 2001 (right) the urbanized area has increased by six to 10.3 km<sup>2</sup> or 25.8% of the total area. Even outside the urbanized area the change of landscape patterns within the last 60 years is clearly to be observed. Consequently carrying out a structural analysis of the landscape of the Sarno River basin by means of the RAF imagery of 1943 to analyze ancient land fragmentation (centuriation) is much likely to yield more detailed data than using present-day aerial photographs.

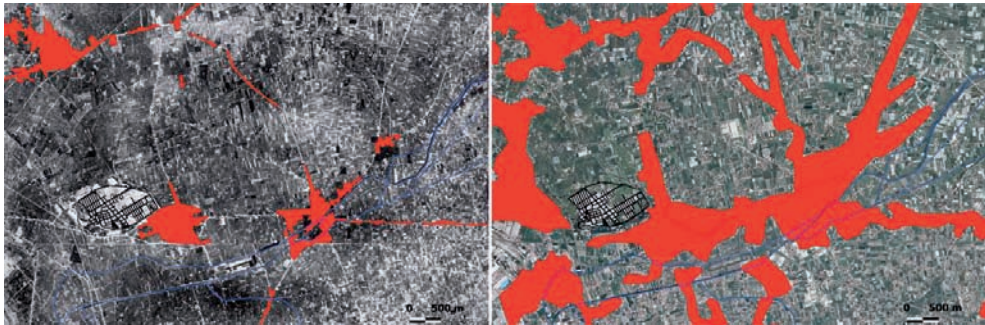
It is noticeable that the RAF aerial photos were inhomogeneous regarding flying altitude (6,400 to 8,800 meters), flying direction and the seasonal aspect between the individual flights (May 1943 and August/September 1943). This results in different lighting conditions, scales and levels of detail of the aerial image mosaic. Furthermore it is evident that certain areas of the Sarno River basin were repeatedly covered by several flights whereas others were missed out.

Most of the rectified RAF aerial photographs fit well. The results within the Sarno River basin are more trustworthy than in the



**Fig. 3:** Digital elevation model (DEM) of the Sarno River basin with the mosaic of the rectified RAF aerial photographs of 1943 on top of it.





**Fig. 4:** Urbanized area around the excavations of Pompeii (red) shown on rectified aerial photos of 1943 (left) and 2001 (right).

surrounding mountain chains. In flat areas residuals were 2 to 5 meters in x and y direction. In mountainous regions deviations of up to 10 meters are locally to be found. This is due to the simple two-dimensional rectification and the generalisation of the topographic maps. Especially dislocations of roads and canals within the 60 years between the date of the photo flight and the creation of the IGM map may also have contributed to these deviations. Despite the high amount of in total 85 rectified RAF aerial photographs some gaps remain that were not covered by the available photographic material. To fill those gaps and to yield more precise data in the adjacent mountain regions in a next step Italian AMI aerial photos of 1943 will be rectified by means of a real photogrammetric **three-dimensional restitution**. Subsequently the historic image data will be used to carry-out a structural analysis of the landscape of the Sarno River basin to analyze ancient land fragmentation (centuriation).

## References

- CASTAGNOLI, F., 1956: Tracce di centuriazioni nei territori di Nocera, Pompei, Nola, Alife, Aquino, Spello. – *Rendiconti dell'Accademia Nazionale dei Lincei*, 8<sup>th</sup> ser. **XI**: 373–378.
- CASTAGNOLI, F., 1958: *Le ricerche sui resti della centuriazione (Note e discussioni erudite 7)*, Rome.
- CHOUQUER, G., CLAVEL-LEVEQUE, M., FAVORY, F. & VALLAT, J.-P., 1987: *Structures agraires en Italie centro-méridionale. – Cadastres et paysages ruraux. Collection de l'Ecole française de Rome 100*, Rome-Paris.
- HECK, V., 2006: *Geoökologische Untersuchungen im PNN Puracé / Kolumbien – Ein Ansatz zur Optimierung der Erfassung von Geo- und Bio-Ressourcen in hochandinen Ökosystemen. – Doctoral thesis, Düsseldorf.*
- LINDER, W., 1999: *Geo-Informationssysteme. – Berlin.*
- LINDER, W., 2003: *Digital Photogrammetry – Theory and Applications. – Berlin.*
- SEILER, F., 2007: *Sarno-Becken: Rekonstruktion der antiken Kulturlandschaften. – www.dainst.org/index\_7902\_de.html (access: November 2008).*
- SEILER, F., 2008: *Rekonstruktion der antiken Kulturlandschaften des Sarno-Beckens. Ein multidisziplinäres Kooperationsprojekt mit Partnern aus Naturwissenschaften und Altertumswissenschaften in Deutschland, Italien und England. – Nuove ricerche archeologiche nell'area vesuviana (scavi 2003–2006), Convegno Internazionale, Roma 1<sup>st</sup>–3<sup>rd</sup> of February 2007: 485–490.*
- SORICELLI, G., 2001: *Divisioni agrarie romane e viabilità nella piana novantina-sarnese. – In: Pompei tra Sorrento e Sarno, Atti del terzo e quarto ciclo di conferenze di geologia, storia e archeologia. Pompei gennaio 1999, maggio 2000 (Roma 2001): 299–319.*

### Addresses of the Authors:

Volker Heck, Universität Siegen, Fachbereich 1/ Geographie, Adolf Reichwein Strasse 2, D-57068 Siegen, Tel.: +49 (0)271 740-3913, Fax: -3912, email: vheck@gmx.de

Sebastian Vogel, Deutsches Archäologisches Institut, Podbielskiallee 69–71, D-14195 Berlin, Tel.: +49 (0)30 187711-358, Fax: -168, email: sv@dainst.de

Manuskript eingereicht: Dezember 2008

Angenommen: Januar 2009





# The Shift from Film to Digital Product: Focus on CORONA Imagery

NIKOLAOS GALIATSATOS, Durham, UK

**Keywords:** Photointerpretation, declassified, photogrammetry, remote sensing, image analysis

**Summary:** This paper discusses the issue of the shift of USGS (United States Geological Survey) in providing a digital instead of a film product for the declassified imagery. The paper focuses on CORONA imagery. With the advent of computers and subsequently the increase of processing power, the sciences of photogrammetry and remote sensing and their respective approaches have evolved into a more interdisciplinary network within which GIS (Geographical Information Science) was a catalyst. The sensor technologies similarly evolved, and the paper discusses potential and trade-offs of this evolution. Applications showed that it is up to the user to select the most appropriate approach and media so as to meet the application's needs.

**Zusammenfassung:** *Der Wandel vom Film zum digitalen Produkt am Beispiel von CORONA Bildern.* Dieser Beitrag diskutiert den Unterschied zwischen der Abgabe eines digitalen anstelle eines filmbasierten Produktes von freigegebenen Aufklärungsbildern durch den USGS (United States Geological Survey). Der Beitrag bezieht sich auf CORONA Bilder. Die weite Verbreitung von Computern mit immer schnellerer Rechenleistung hat dazu geführt, dass Photogrammetrie und Fernerkundung Bestandteil eines interdisziplinären Netzwerkes geworden sind, deren Ausbreitung durch die Einbindung in GIS (Geographisches Informationssystem) zusätzlich beschleunigt wurde. Ähnlich entwickelte sich die Sensortechnologie. Der Beitrag diskutiert Vor- und Nachteile dieser Entwicklung. In der Praxis hat sich gezeigt, dass der Nutzer entscheiden muss, welchen Ansatz und welches Medium für seine Anwendungen am besten geeignet sind.

---

## 1 Introduction

On 3<sup>rd</sup> of September 2004, USGS decided to stop providing photographic products to the public<sup>1</sup>. Instead, digital products will be produced and provided. Once the film is digitized, most of it will continue to be stored in the USGS facilities. Film with vinegar syndrome will be sent to NARA (National Archives Record Administration) to be placed in frozen storage.

The decision of USGS to cease operations in the creation of photographic products raised once again the issue of whether the modern photogrammetric scanners can capture the full film quality or not, and whether it is better

to extract information from film or from digital product.

This paper is comparing the two products with main focus on declassified imagery, in particular the film product of KH-4B (KH for KeyHole) satellite design of the CORONA program. However, the discussion can be accommodated in other photographic products and applications too.

LEACHTENAUER et al. (1997) did the first research on the problem of how to best use the CORONA product. After experiments with KH-4A film product, they concluded that for lossless digitizing, a 4 µm digitizing spot size is required. However, as GALIATSATOS (2004) proved, the CORONA program had a variety of films, lens, filters, and cameras. This variety resulted in different image quality even between cameras of the same mission.

---

<sup>1</sup> [edc.usgs.gov/USGSStopPhotographicProduction.html](http://edc.usgs.gov/USGSStopPhotographicProduction.html) (last accessed: December 2008)

LEACHTENAUER et al. (1997) did not discuss on other ways of using the film, on the film properties (e. g., density, sensitivity), or the film quality itself. This paper aims to continue the work of LEACHTENAUER et al. (1997) through developing on the not-fully developed issues.

The discussion will be application-oriented with main focus on current trends and existing work.

In the following sections, first a brief historical summary of the CORONA imagery is presented. The main characteristics of the film and the filters are then illustrated as they were found in the declassified documentation. A brief history follows regarding the transfer from photointerpretation to image analysis and the eventual complementary role of the methods regardless of the media (film or digital). The transfer from film to CCD sensors is

then discussed and the trade-offs are briefly presented. Finally, the focus goes back to CORONA and particular applications with all the issues that were met.

## 2 CORONA Imagery

CORONA was a program designed to support U.S. Intelligence between 1958 and 1972. It officially started with a formal endorsement by President Dwight E. Eisenhower on 8<sup>th</sup> February 1958 (HALL 1997). The launch operations began on 25<sup>th</sup> June 1959. On 10<sup>th</sup> August 1960, the diagnostic mission was successful, and 2 days later, on 12<sup>th</sup> August, the capsule for the film was “recovered undamaged”. After eight failures in photoreconnaissance, the first successful mission occurred on 18<sup>th</sup> Au-

**Tab. 1:** Major operational and construction difference among CORONA designs.

	KH-1	KH-2	KH-3	KH-4	KH-4A	KH-4B
Period of operation	27/6/59–13/9/60	26/10/60–23/10/61	30/8/61–13/1/62	27/2/62–24/3/64	24/8/63–22/9/69	15/9/67–25/5/72
Amount of frames	1432	7246	9918	101743	517688	188526
Mission life (days)	1	2–3	1–4	6–7	4–15	19
Altitude (km)						
Lower (estimated)	192	252	217	211	180	150
Higher (estimated)	817	704	232	415	n/a	n/a
Successful missions	1	3	5	20	49	16
Targets	USSR	Emphasis on USSR		Worldwide/emphasis on denied areas		
Aperture width	5.265°	5.265°	5.265°	5.265°	5.265°	5.265°
Pan angle	71.16°	71.16°	71.16°	71.16°	71.16°	71.16°
Lens	F/5.0 Tessar	F/5.0 Tessar	F/3.5 Petzval	F/3.5 Petzval	F/3.5 Petzval	F/3.5 Petzval
Focal length (cm)	61	61	61	61	61	61
Resolution						
Ground (m)	12.20	7.60	3.70–7.60	3.00–7.60	2.70–7.60	1.80–7.60
Film (lp/mm)	50–100	50–100	50–100	50–100	120	160
Nominal ground coverage per image frame	15.3×209 to 42×579 (km)	15.3×209 to 42×579 (km)	15.3×209 to 42×579 (km)	15.3×209 to 42×579 (km)	17×232 (km)	13.8×188 (km)
Nominal photoscale in film	1 : 275,000 to 1 : 760,000	1 : 275,000 to 1 : 760,000	1 : 275,000 to 1 : 760,000	1 : 300,000	1 : 305,000	1 : 247,500

gust 1960 when the first CORONA image of an intelligence target was acquired during Mission 9009 (McDONALD 1995).

The camera carried on that Mission would be retrospectively designated the KH-1. The next successful CORONA Mission would be conducted on 7<sup>th</sup> December 1960. This time a more advanced camera system, the KH-2, was on board. From that time, through to the end of the CORONA program in 1972, there was a succession of new camera systems – the KH-3, KH-4, KH-4A and KH-4B. In the end, CORONA acquired over 800,000 frames of photographs with a total coverage of at least 600 to 750 million nmi<sup>2</sup> (square nautical miles) of the Earth's surface. On 22<sup>nd</sup> February 1995, President Clinton signed the Executive Order 12951 that declassified those images (CLINTON 1995a). Furthermore, the President delegated any future declassification approval to the Director of Defense and State. However, the Executive Order 12951 addresses only the imagery declassification. Other declassification (e. g., CORONA reports) falls under Executive Order 12958 (17<sup>th</sup> April 1995) (CLINTON 1995b). The latter was amended by executive order 13292 (25<sup>th</sup> March 2003) (BUSH 2003).

Tab. 1 summarizes the major developments in the CORONA satellite program. The main differences lay in the improvement of the lens, the creation of tougher and finer film, the boost capacity of the rocket, the better control of vehicle stability, and last but not least, the freedom to innovate and to redesign the satellite from scratch. It must be noted that improvements were incorporated into every mission.

All the values in Tab. 1 are nominal. For precise values in every mission, the reader should consult the original NRO and NARA reports (GALIATSATOS 2004). Tab. 1 was made based on information from McDONALD (1997), MADDEN (1996), DAY et al. (1998), and PEEBLES (1997).

Some of the nominal values of the Tab. 1 are very general and only roughly represent the real values. In this paper we shall focus on the parameters that are relevant to the image quality.

Various factors affect the resolution of the panoramic cameras: the resolution capacity of the optics (Petzval lens), the resolution capacity of the film, the focus condition of the lens,

the exposure and development of the film, and the blur which results from the motion of the aerial image across the film during exposure (NRO 1967). There are many ways to determine what resolution is.

The Itek engineers were aware of the effect that the angle of the camera with the target and the sun may have to the image quality. For this reason, they were using different camera systems (film, filter) depending on the viewing angle of the camera and the direction of the platform. In more advanced systems, the filter was changing depending on the orbit (ascending / descending), the latitude of the target and the solar altitude. During the CORONA program, constantly all involved companies (e. g., Itek, Kodak) were experimenting with every mission.

The main purpose during operations in the 1960s was to increase the performance of the photointerpretation. As we read in NRO (1967), the focus was on improving the micro-contrast, that is the contrast when in high magnification. Thus, the photointerpreter was able to identify small details in the image.

### 3 Film Photographic Properties

#### 3.1 Characteristic Curve

According to NRO (1970), during the earliest missions, the CORONA project used variable spray processing conditions for 3404 film. This included a three-level processing – primary, intermediate and full (which provided different sensitometric responses). Beginning with mission 1104 (7<sup>th</sup> August 1968), a single level yardleigh viscous process was used (cf. Fig. 1). On July 1970 Eastman Kodak replaced film 3404 with film 3414. According to NRO (1970), the 3414 emulsion characteristics are similar to 3404 emulsion with the exception of spectral response and film speed.

#### 3.2 Spectral Sensitivity

Fig. 2 displays the spectral sensitivity of the films 3404 and 3414, along with the films used in index, horizon and stellar cameras. Notice

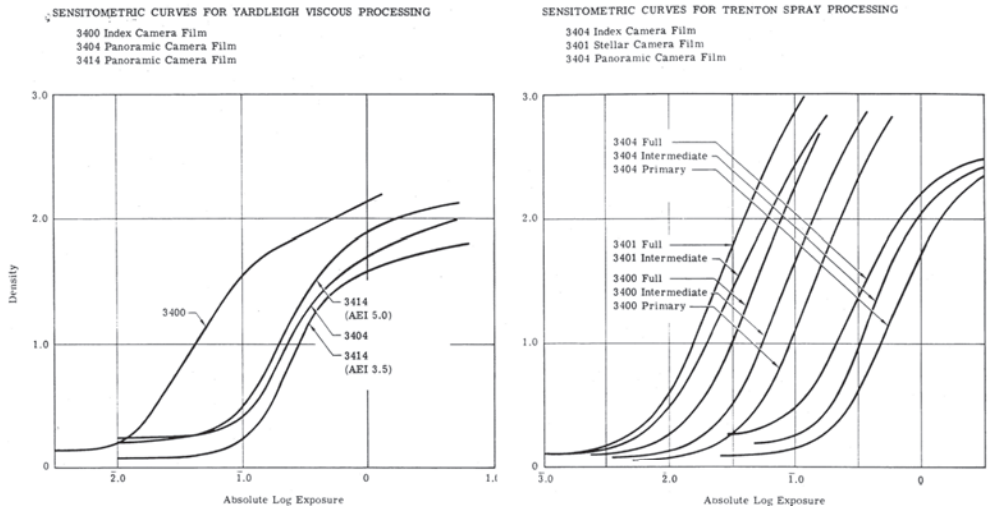


Fig. 1: Sensitometric curves for two different processing methods (NRO 1970).

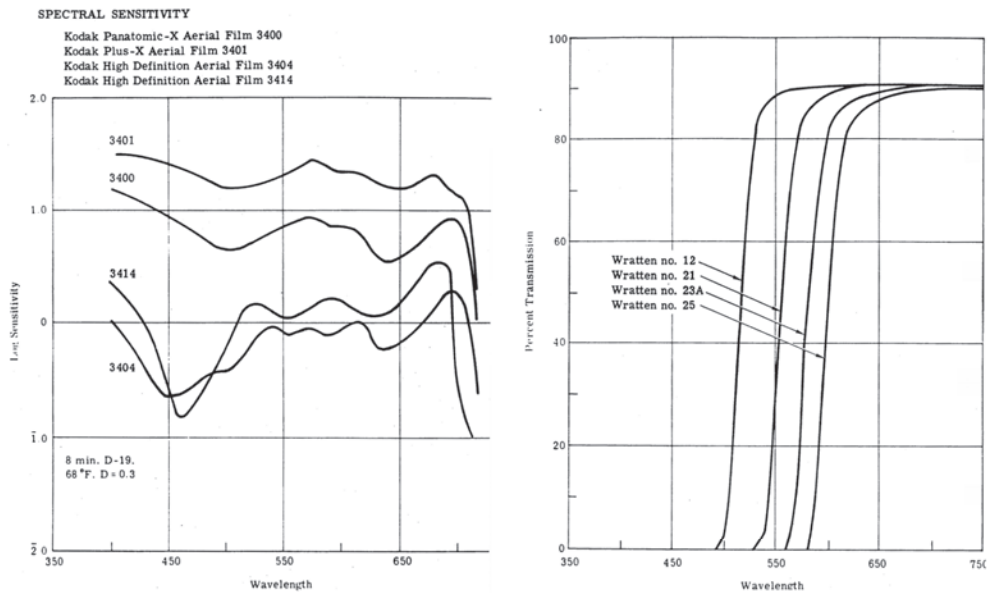
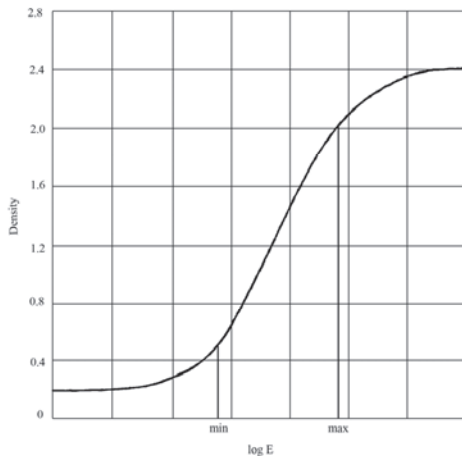


Fig. 2: Spectral sensitivity curves of the CORONA films (left) and characteristic curves of CORONA filters (right) (NRO, 1970).

the higher sensitivity of the films 3404 and 3414 in the red part of the spectrum and compare it with the filters that were used in the CORONA program.

### 3.3 Dynamic Range

The definition of the dynamic range of the film is important for deciding the radiometric resolution of the scanning. Fig. 3 displays the dynamic range of the 3404 film through the assumed acceptable minimum and maximum



**Fig. 3:** Assumed acceptable minimum and maximum density points for film 3404 (NRO 1970).

density points. This figure highlights the radiometric resolution of the film (1.5D), which empirically corresponds to a 7-bit radiometric resolution (McGLONE 2004).

### 3.4 Filters

Filters are required for most aerial reconnaissance systems in order to counteract the contrast reduction effects from the bluish haze light. The filters commonly employed in CORONA project are Wratten gelatine filters and are yellow to red in color. Generally, the deeper red the filter, the greater the haze cutting ability and the higher the contrast. However, the redder the filter, the higher the filter factor which in turn makes longer exposure times necessary. Apart from Wratten filters, there were experiments with color correction and polarizing filters in various missions. Because gelatine filters were drying out in the vacuum of space, glass filters were used with the same thickness as gelatine filters. Fig. 2 displays the different filters that were applied during the CORONA program.

## 4 Evolution of Sciences

Photography existed long before satellite observation. L.J.M. Daguerre and J.N. Niepce

developed the first commonly used form of photograph between 1835 and 1839. In 1845, the first panoramic photograph was taken, and in 1849 an exhaustive program started to prove that photography could be used for the creation of topographic maps. The same year, the first stereo-photography is produced. In 1858, Gaspard Felix Tournachon took the first known photographs from an overhead platform, a balloon (PHILIPSON 1997). For the next 101 years, aerial photography was developed and widely used in military and civilian applications. The platforms changed to include kites, pigeons, balloons and airplanes (chapter 2 in REEVES 1975). The era of satellite photogrammetry (SLAMA et al. 1980) starts in 1960 with the CORONA military reconnaissance program. The era of using satellite images for mapping and making measurements starts in 1962 with the CORONA KH-4 satellite design.

COLWELL (1960) defined photographic interpretation (also termed photointerpretation) as

*“the process by which humans examine photographic images for the purpose of identifying objects and judging their significance”.*

With the advent of computer technology, the methods for photographic interpretation changed and the new term *image analysis* (also termed *quantitative analysis*) came to complement (underlined) the old term:

*“Image analysis is the process by which humans **and/or machines** examine photographic images **and/or digital data** for the purpose of identifying objects and judging their significance” (PHILIPSON 1997).*

Photointerpretation involves direct human interaction, and thus it is good for spatial assessment but not for quantitative accuracy. By contrast, image analysis requires little human interaction and it is mainly based on machine computational capability, and thus it has high quantitative accuracy but low spatial assessment capability.

Today, both techniques are used in very specific and complementary ways, and the approaches have their own roles. On one hand, if digital image processing is applied beforehand to enhance the imagery, then this helps the



photointerpreter in his work. On the other hand, image analysis depends on information provided at key stages by an analyst, who is often using photointerpretation (RICHARDS & JIA 1999).

KONECNY (2003) defines *remote sensing* and *photogrammetry* according to their object of study:

*“Photogrammetry concerns itself with the geometric measurement of objects in analogue or digital images”.*

*“Remote sensing can be considered as the identification of objects by indirect means using naturally existing or artificially created force fields”.*

Thus, photogrammetric techniques were adopted by remote sensing mainly for quantitative analysis. In its turn, remote sensing expanded the data that could aid an image analyst with the extraction of quantitative information.

All of the above terms give a specific meaning to the approaches, but the approaches complement each other when it comes into implementation. In other words, the sciences of photogrammetry and remote sensing moved from the previous independent way of working, towards a more interdisciplinary network,

where in comparison with other sciences like GIS, Geodesy, and Cartography, they produce better results and increase the processing capability for modern day applications (cf. Fig. 4).

### 5 Evolution of Technology

The interdisciplinary approach has been encouraged by developments in computer technology, especially Geographical Information Systems. In the past, the main product was film or photographic print recorded at visible wavelengths (some special colour films were sensitive in IR light too). The distance of cameras from the Earth’s surface and the need for high ground resolution (especially for military reconnaissance programs) demanded a sufficiently high resolution film. This led to the production of films with 160 lp/mm resolution (CORONA program), 320 lp/mm (GAMBIT program), and higher. Even with today’s technology, such resolutions cannot be transferred to digital format for computer processing without loss of data and interpretability. During that era, the best approach was photointerpretation alone, since the computers were not powerful enough to read and analyse such huge amount of data. Thus, with the use of

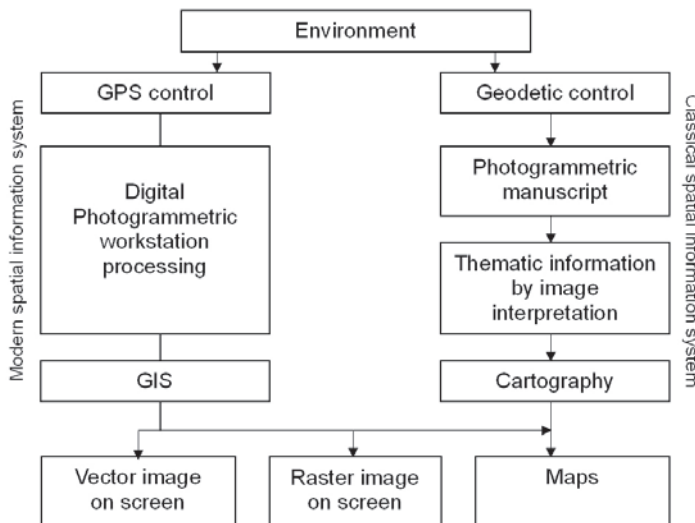


Fig. 4: Classical and modern geospatial information system (reproduced from KONECNY 2003).

large light-tables and magnifiers, the film was analysed by the most advanced computer in existence, the human brain.

In 1970, W. Boyle and G. Smith of Bell Labs discovered the CCD (Charge-Coupled Device) (BOYLE & SMITH 1970). CCD is an imaging electro-optical sensor. It can record radiation from a ground resolution element for representation within a pixel in an image. The simplest CCD array is linear (REES 1999). Later, the CCD was improved and it became the dominant process for image capture. Although other devices became available (e.g., CMOS – Complementary Metal Oxide Semiconductor), the CCD gives the best performance in terms of resolution, sensitivity, and other parameters, with the exception of cost. FELBER (2002) provides a very good summary of the development, structure and operation of CCDs.

The product of CCD image capture is a matrix of digital picture elements (pixels). It can be attached to detectors that are sensitive to a wide range of wavelengths. It is sensitive to the visible, near-infrared, near-ultraviolet, thermal and microwave parts of the electromagnetic spectrum. On the contrary, film is limited to available film emulsions and spectral characteristics.

When comparing film with the CCD in photogrammetry and remote sensing applications, the former has the advantages of finer resolution, rigorous geometry and being a mature technology (established reliability of performance, with support and systems existing worldwide). But the processing of the film itself introduces distortions that are nearly impossible to model (treatment during film development, film must be scanned).

The product of CCD image capture may be derived from CCD matrices or CCD linear arrays. Depending on the product, the user has to apply different techniques for the optimum gain of qualitative and/or quantitative information. Always, the user must know as much as possible about the product's background. Further processing mainly depends on the aims and objectives and the tools used to aid the process.

The CCD matrices share the same conical geometry with film cameras. The resolution is coarser, but there is rigorous geometry with

better precision and fewer distortions when compared to film (KASSER 2002a).

On the other hand, the CCD linear arrays have cylindro-conical geometry. This type of geometry is found on most of today's satellite sensors (Landsat, IKONOS, SPOT, etc.), even though not all of them use CCDs (Landsat) (KASSER 2002b). This geometry implies new digital data process approaches, which forbid the use of standard software of classic photogrammetric stations (KASSER 2002a).

TORLEGARD (1992) wrote that the aerial film camera would be the main sensing system for map production and revision in large- and medium-scale cartography for the next several years. LIGHT (1996) presents a list of tradeoffs between CCD and film sensors, and Fricker et al. (1999) identify practical difficulties for the transition from film to digital. Today, one would agree that the high resolution space systems and the CCD sensors have improved significantly and are already replacing film cameras in most applications.

The airborne imagery cannot be replaced mainly because of limitations in the use of spaceborne sensors (FRICKER 2005). For this reason, in the recent years there has been development of airborne digital sensors such as Leica ADS80 (Airborne Digital Sensor), Microsoft UltraCamX™, and Integraph Z/I Imaging® DMC® (Digital Mapping Camera) systems. Recent improvements in the automation and quality of the sensors (JACOBSEN 2007) have resulted in an increase of commercially available digital systems.

## 6 Focus on Applications

TAPPAN et al. (2000) preferred to photointerpret CORONA straight from the film without any digitizing. This is a rigorous approach but it inhibits the GIS potential of data integration. BINDSCHADLER & VORNBERGER (1998) scanned the film to a satisfactory scale for their application, while PALMER (2002) preferred to create large scale photographic prints and then process these on a flatbed scanner. Palmer's approach is simple but effective and demonstrates that for certain applications complex data pre-processing may not be necessary.

From the above, it is necessary to mention that the way CORONA will be prepared depends heavily on the needs of the application and the expertise of the people using it. This means that no matter how well the CORONA film is scanned at the USGS facilities, the final digital product can be a major burden for people who do not have the relevant expertise or computing power to handle it.

As GALIATSATOS (2004) concludes, the use of photogrammetric scanner for the scanning of the CORONA film is probably the best solution for the creation of digital product. The main reasons are the capability to scan at high resolution without interpolation, and the resulting digital files are geometrically corrected. The latter is achieved by the use of specific algorithms that reproduce the correction model of the scanner's errors. USGS is using photogrammetric scanner (Leica DSW700), and the film is scanned to the highest optical resolution of the scanner (7  $\mu\text{m}$ ), where the scanner utilizes a Schneider 120 mm, f/5.6, color-corrected lens. The radiometric uniformity is calibrated monthly and the geometric accuracy is calibrated periodically through the year (there is an effort to do it monthly) and is less than 2 micron (BORCHARDT 2005; 2009, personal communication).

As LEACHTENAUER et al. (1997) showed the 4  $\mu\text{m}$  would be the ideal scanning resolution so as to scan the film without any loss of information. This is a good reason for people to insist on using the film. On the other hand, is it really important this difference in resolution for the majority of applications?

THOM (2002) shows, that the smaller the step of scan, the better will be the precision and the spatial resolution, but there may also be loss of radiometric precision. In practical applications, the impact of radiometric quality on the geometric precision is not easy to evaluate. Generally, weakly contrasted details can be separated when attention has been given to the radiometric quality. The USGS digital product of CORONA imagery shows that the majority of the radiometric values represented on the film are captured. From the film density range we gather that the film is roughly 7-bit and empirically we need to scan two bits more so as to capture the full range. The USGS digital product is 8-bit, still more than the assumed den-

sity range of the film, however not as much as experience dictates. In most applications though, this is a negligible difference.

GALIATSATOS et al. (2008) identified a distortion in the texture of the imagery after they discovered the result of it in the extracted DEM. They used Vexcel VX4000 which is a matrix (or area) scanner. KASSER (2002c) points out that even if a calibration is applied to the scanner, some irregularities may persist. For example, calibration errors or dust particles will affect the radiometric precision of the scanning. In particular for matrix CCD scanners, there will be periodic and annoying artefacts due to repetition of errors according to a regular paving, and of radiometric discontinuities between successive positions of the matrix. BALTSAVIAS (1999) mentions that there may be radiometric differences along the seam lines of the partial scans of the matrix.

The DSW700 is a matrix scanner too, and a similar texture distortion of smaller extent was detected (STICHELBAUT 2008, personal communication) by the research team that is working in the Altai region of Siberia (GHEYLE et al. 2004). This is an issue that has not been resolved yet. JACOBSEN & GAFFGA (1998) demonstrate the issue of image quality deterioration during scanning. Other problems that were identified in the USGS digital product were Newton rings and dust particles.

## 7 Conclusions

As the world evolves, things change. Some time ago photogrammetry and remote sensing communities worked independently, and the digitizing of the film was technically impossible. Nowadays, the sciences have approached and complement each other in an interdisciplinary way. Similarly, the processing power of modern personal computers allows the digital analysis of large amounts of data. So, the transfer of media from the film to the digital is an inevitable result of the world's evolution, similar to the transfer from the papyrus to the codex, and from the codex to the book.

The digitizing is not perfect, even if the professional photogrammetric scanners are used. It may not capture the full information included in the film and some errors may be incorpo-

rated in the effort to get as much information as possible, especially if care is not taken with regard to radiometric precision.

Ultimately, it depends on the application needs, and most applications do not require more than what the photogrammetric scanners can offer. Some applications actually used photographic printing techniques and flatbed scanners, and even though these techniques did not capture the full potential of CORONA imagery, they still provided useful results.

In summary, the USGS digital product is not a perfect representation of the information content of the film. However, it captures the greatest amount of the information content within the limits of the available technology. The final image file may be large but modern technology can handle it without much trouble. It is the user who should be aware of the product's background (e. g., scanning artifacts, film characteristics) and should have the expertise to utilize the full potential of the acquired image information in a GIS environment.

On the other hand, the film duplication process is not perfect either, as the printer introduced a slight stretch in the Y-axis (HAPPELL 2000, personal communication). The technology to directly process the particular film frame is difficult to find today, as it only existed within the intelligence community. Again, it depends on the user's expertise as to how the film will be processed. For this, the film offers more freedom to the user to select an approach for the application. However, if it is not digitized then any potential use of GIS is inhibited.

## Acknowledgements

The author appreciates the helpful and detailed comments given by anonymous reviewers.

For the provision of CORONA documents, many thanks to FOIA (Freedom Of Information Act) coordinator of the NRO (National Reconnaissance Office).

## References

- BALTSAVIAS, E. P., 1998: Photogrammetric scanners – survey, technological developments and requirements. – *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* **32** (1): 44–52.
- BINDSCHADLER, R. A., & VORNBERGER, P., 1998: Changes in the west Antarctic ice sheet since 1963 from declassified satellite photography. – *Science* **279** (689): 689–692.
- BOYLE, W. S. & SMITH, G. E., 1970: Charge coupled semiconductor devices. – *Bell systems technical journal* **49**: 587–593.
- BUSH, G. W., 2003: Further amendment to Executive Order 12958, as amended. – *Classified national security information*, 25 March 2003, Washington D.C.
- CLINTON, W. J., 1995a: Release of imagery acquired by space-based national intelligence reconnaissance system. – Executive Order No. 12951, 22 February 1995, Washington D.C.
- CLINTON, W. J., 1995b: Classified national security information. – Executive Order No. 12958, 17 April 1995, Washington D.C.
- COLWELL, R. N. (ed.), 1960: *Manual of photographic interpretation*. – American Society for Photogrammetry.
- DAY, D. A., LONGSON, J. M. & LATELL, B. (eds.) 1998: *Eye in the sky – The story of CORONA spy satellites*. – Smithsonian Institution Press, Washington.
- FELBER, P., 2002: Charge-coupled devices: a literature study as a project for ECE 575. – Illinois institute of technology.
- FRICKER, P., SANDAU, R. & WALKER, A. S., 1999: Airborne digital sensors – a new approach. – Joint workshop of ISPRS WG I/1, I/3, and IV/4: "Sensors and mapping from Space", Hannover, Germany.
- FRICKER, P., 2005: The benefits of an airborne digital sensor – An advanced system for high-resolution web-based multispectral imagery. – *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **71** (11): 1243–1244.
- GALIATSATOS, N., 2004: Assessment of the CORONA series of satellite imagery for landscape archaeology: a case study from Orontes valley, Syria. – PhD dissertation, Durham University, Geography department, UK.
- GALIATSATOS, N., DONOGHUE, D. N. M., & PHILIP, G., 2008: High resolution elevation data derived from stereoscopic CORONA imagery with minimal ground control: an approach using IKONOS and SRTM data. – *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **74** (9): 1093–1106.
- GHEYLE, W., BOURGEOIS, J., GOOSSENS, R., DE WULF, A., & WILLEMS, T., 2004: Localisation of Scytho-

- Siberian burial mounds and detailed mapping of remote areas (topography, geomorphology, and DEM), by means of CORONA satellite imagery. – 24<sup>th</sup> EARSeL Symposium: New strategies for European remote sensing, Dubrovnik, Croatia.
- HALL, R. C., 1997: Post War Strategic Reconnaissance and the Genesis of the project Corona. – In: *Corona Between the Sun and the Earth The First NRO Reconnaissance Eye in Space*. – American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- JACOBSEN, K. & GAFFGA, R., 1998: Calibration of the photogrammetric image scanner Rastermaster RM1. – *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* **32** (1): 75–79.
- JACOBSEN, K., 2007: Geometry of digital frame cameras. – ASPRS 2007 Annual Conference - Identifying Geospatial Solutions, Tampa, Florida.
- KASSER, M., 2002a: Digital image acquisition with airborne CCD cameras. – In: *Digital Photogrammetry*, Taylor and Francis: London, UK.
- KASSER, M., 2002b: Geometry of aerial and spatial pictures. – In: *Digital Photogrammetry*, Taylor and Francis: London, UK.
- KASSER, M., 2002c: Use of scanners for the digitisation of aerial pictures. In: *Digital Photogrammetry*, Taylor and Francis: London, UK.
- KONECNY, G., 2003: Geoinformation: Remote sensing, Photogrammetry and Geographic Information Systems. – Taylor and Francis, London, UK.
- LEACHTENAUER, J. C., DANIEL, K. & VOGL, P. T., 1997: Digitising Corona Imagery: Quality vs. Cost. – In: *Corona Between the Sun and the Earth The First NRO Reconnaissance Eye in Space*. – American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- LIGHT, D. L., 1996: Film cameras or digital sensors? The challenge ahead for aerial imaging. – *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **62** (3): 285–291.
- MADDEN, F. J., 1996: The CORONA camera system. – Itek's contribution to world stability, self-published.
- MCDONALD, R. A. (ed.), 1997: *CORONA Between the Sun and the Earth The First NRO Reconnaissance Eye in Space*. – American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- MCGLONE, C. (ed.), 2004: *Manual of Photogrammetry*. – American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- NATIONAL RECONNAISSANCE OFFICE (NRO), 1967: J-3 photographic system: technical proposal system analysis studies. – National Photographic Interpretation Centre.
- NATIONAL RECONNAISSANCE OFFICE (NRO), 1970: CORONA technical information volume 2. – National Photographic Interpretation Centre.
- PALMER, R., 2002: A poor man's use of CORONA images for archaeological survey in Armenia. – *Proceedings of the conference: Space applications for heritage conservation*, Strasbourg, France.
- PEEBLES, C., 1997: *The CORONA project: America's first spy satellites*. – Naval Institute Press, Annapolis, Maryland.
- PHILIPSON, W. R. (ed.), 1997: *Manual of photographic interpretation*. – Science and engineering series, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- REES, G., 1999: *The remote sensing data book*. – Cambridge University Press.
- REEVES, R. G. (ed.), 1975: *Manual of remote sensing*. – American Society for Photogrammetry.
- RICHARDS, J. A. & JIA, X., 1999: *Remote Sensing digital image analysis – An introduction*. – Springer, Berlin.
- SLAMA, C. C., THEURER, C. & HENRIKSEN, S. W. (eds.), 1980: *Manual of Photogrammetry*. – American Society for Photogrammetry.
- TAPPAN, G. G., HADI, A., WOOD, E. C. & LIETZOW, R. W., 2000: Use of Argon, Corona and Landsat imagery to assess 30 years of land resource changes in west-central Senegal. – *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **66** (6): 727–735.
- THOM, C., 2002: Relations between radiometric and geometric precision in digital imagery. – In: *Digital Photogrammetry*. – Taylor and Francis: London, UK.
- TORLEGÅRD, K., 1992: Sensors for photogrammetric mapping: Review and prospects. – *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **47**: 241–262.

#### Address of the Author:

Dr. NIKOLAOS GALIATSATOS, Durham University, Science Laboratories, Department of Archaeology, South Road, Durham DH1 3LE, UK, Tel.: +44-191-3341167, Fax: +44-191-3341101, e-mail: nikolaos.galiatsatos@durham.ac.uk

Manuskript eingereicht: Januar 2009

Angenommen: Februar 2009



# Automatische Koregistrierung von ALS-Daten aus mehreren Schrägansichten städtischer Quartiere

MARCUS HEBEL, Ettlingen & UWE STILLA, München

**Keywords:** Airborne laserscanning, co-registration, oblique view, urban area

**Summary:** *Automatic Co-Registration of Airborne Laser-scanner Data Recorded at an Urban Area with Oblique Sensor Configuration.* Data originating from nadir airborne laser scanning (ALS) of urban regions is commonly used as a basis for 3D city modeling. These data are lacking information concerning the facades of buildings, whereas structures of roofs are missing in terrestrial laser data. To close this gap, the scene can be captured from several directions with an oblique looking airborne laser scanner, requiring an accurate co-registration of different data sets. This paper aims at automatic filtering of 3D points recorded at an urban region and subsequent co-registration of multiple data sets on the basis of detected rooftops. Instead of applying a standard Iterative Closest Point (ICP) approach, we identify corresponding planar structures in the data sets. Two variations of a method for automatic co-registration are proposed and tested with four ALS data sets showing the urban test area TUM (Technische Universität München) from different views.

**Zusammenfassung:** In Schrägsicht von einem fliegenden Träger aufgenommene Laserdaten erlauben eine gleichzeitige Erfassung von Fassaden und Dachlandschaften. Aufgrund der durch die Schrägsicht entstehenden Abschattungen sind jedoch mehrere von verschiedenen Ansichten streifenförmig aufgenommene Laserpunktwolken zu koregistrieren und zu kombinieren. Dabei sollen oft auch bereits vorliegende 3D-Daten anderer Herkunft mit einbezogen werden. Die vorliegende Arbeit beschreibt eine Vorgehensweise zur automatischen Filterung von 3D-Einzelpunkten zur anschließenden Koregistrierung anhand erkannter Häuserdächer. Anstelle des punktbasierten Iterative Closest Point (ICP) Verfahrens kommen dabei Methoden zum Einsatz, die auf der Zuordnung planarer Strukturen beruhen. Es werden zwei Varianten eines Verfahrens vorgestellt und anhand von vier exemplarischen Datensätzen untersucht, die das urbane Testgebiet TUM (Technische Universität München) aus verschiedenen Ansichten zeigen.

---

## 1 Einleitung

### 1.1 Airborne Laser Scanning

Die Basis des luftgestützten Laserscanning (ALS – Airborne Laser Scanning) bildet ein LiDAR-Messverfahren (engl. light detection and ranging), das direkte Entfernungsmessungen liefert und sich im Bereich der Photogrammetrie und Fernerkundung zur Geländeaufnahme etabliert hat. ALS-Daten werden oftmals auch als Grundlage für eine 3D-Stadtmodellierung verwendet. Typische Anwendungen für 3D-Stadtmodelle können bei der Stadtplanung, dem Tourismus und der Telekommunikation (Planung der Standorte für

Mobilfunkanlagen) gesehen werden. Eine Übersicht zu den Anwendungen und eine umfassende Beschreibung der ALS-Grundlagen werden z. B. in (WEHR & LOHR 1999) gegeben. Lasermessungen weisen gegenüber klassischen Messungen mit Luftbildern den Vorteil auf, dass die 3D-Information unmittelbar bereit steht und unabhängig von vorliegenden Beleuchtungsverhältnissen ist. Damit sind diese Sensoren auch für Überwachung und Monitoring geeignet.

Einige kommerziell verfügbare Laserscanner wie der von uns benutzte Riegl LMS-Q560 sind außerdem in der Lage, den Signalverlauf des reflektierten Laserpulses aufzuzeichnen, was neue Methoden der Datenauswertung ermöglicht (JUTZI & STILLA 2006). Zusätzlich zur

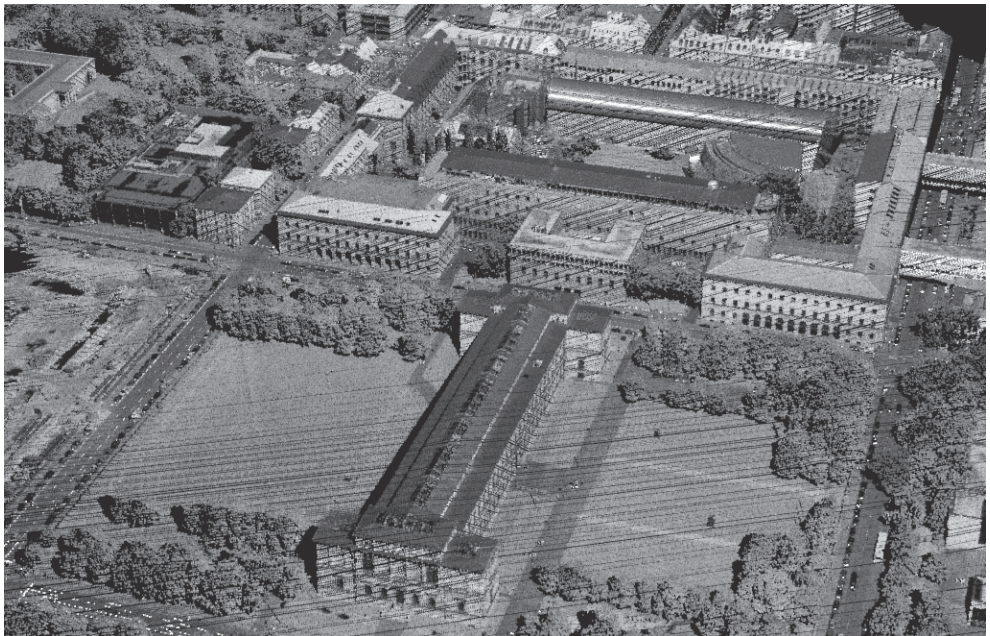
Erfassung mehrerer Entfernungswerte pro Laserpuls wie sie beispielsweise durch Bäume verursacht werden (REITBERGER et al. 2008a und 2008b, RUTZINGER et al. 2008), können Merkmale wie Amplitude oder zeitliche Pulslänge der reflektierten Pulse untersucht werden (STILLA & JUTZI 2009). Die aufgezeichneten Entfernungsdaten werden in der Regel direkt georeferenziert (z. B. in UTM-Koordinaten), wozu typischerweise eine Kombination aus Differential-GPS Empfänger und kreiselbasierter Inertialsensorplattform (INS, inertiales Navigationssystem) am Sensorträger zum Einsatz kommen. Für die hier zugrunde liegenden Messungen wurde das kommerziell erhältliche Navigationssystem POS AV der Firma Applanix eingesetzt, das für die Messdatenerfassung zusammen mit dem Laserscanner an einem Hubschrauber Bell UH-1D montiert war. Abb. 1 zeigt einen Ausschnitt der mit dieser Sensorkonfiguration über dem Testgebiet TUM erfassten 3D-Laserpunktwolke.

Es handelt sich bei Abb. 1 nicht um eine photographische Aufnahme, sondern um die Darstellung einer 3D-Punktwolke mit ca. 900.000 Einzelpunkten, deren bildhafter Ein-

druck durch die Texturierung entsprechend der gemessenen Amplitude der rückgestreuten Laserpulse entsteht (diese gibt die Reflektivität im nahen Infrarot bei 1.5  $\mu\text{m}$  Wellenlänge wieder). Das im unteren Bildteil auffällige streifenförmige Muster lässt die Ausrichtung der Abtastung erkennen.

## 1.2 Problembeschreibung und Motivation

Für photogrammetrische Anwendungen werden flugzeuggetragene Lasersensoren üblicherweise in Nadirsicht betrieben, d. h. mit Blick senkrecht von oben auf die Szene. Dies ermöglicht in städtischen Bereichen eine weitgehend unverdeckte Aufnahme von Dachlandschaften und Bodenflächen. Die von uns verwendete Konfiguration mit einem in 45° Schrägsicht vorwärts blickenden Zeilenscanner am Hubschrauber erlaubt auch eine detaillierte Erfassung von Fassaden, die in Nadirsicht nur unzureichend abgebildet werden. Der relativ große Scanbereich von 60° je Scanzeile ist quer zur Flugrichtung orientiert (vgl.



**Abb. 1:** 3D-Amplitudendaten vom Testgebiet TUM, aufgezeichnet in 45° Schrägsicht nach vorne blickend. Im Vordergrund ist die Alte Pinakothek zu erkennen, im Hintergrund das Stammgelände der Technischen Universität München.

Abb. 1). Die Schrägsicht führt allerdings dazu, dass aus Sensorposition gesehen hinter den Gebäuden Abschattungen entstehen. Dieser Mangel lässt sich durch eine Mehrfachabtastung des gleichen urbanen Gebiets aus verschiedenen Richtungen (z. B. kreuzweise) mit anschließender Koregistrierung der einzelnen Datensätze beheben. Zur schnelleren Szenenerfassung könnte beispielsweise ein zweiter Zeilenscanner mit gleichem Schrägsichtwinkel rückwärts blickend montiert werden. Auch ließe sich durch spezielle Ablenkspiegel ein entsprechendes Scanmuster realisieren.

Aufgrund von systembedingten Ungenauigkeiten ist eine Korrektur der gemessenen 3D-Datensätze notwendig. Viele Untersuchungen haben sich in den letzten Jahren mit diesem Problem befasst, wobei zunächst Möglichkeiten zur Qualitätsbeurteilung von streifenweise erfassten ALS-Daten erarbeitet wurden. So können zum Beispiel Unterschiede zwischen den Einzelstreifen durch die jeweils abgeleiteten digitalen Höhenmodelle bestimmt werden (RESSL et al. 2008). Bei Betrachtung von Daten eines urbanen Gebiets ist es auch möglich, Diskrepanzen zwischen überlappenden Streifen anhand der Unterschiede zwischen extrahierten Dachfirsten zu bewerten (VOSSELMAN 2008).

Die Lösungsansätze zur Korrektur von ALS-Daten variieren mit den jeweils betrachteten Fehlerquellen. FILIN (2003) nennt mehrere systematische Effekte, die bei der ALS-Messdatenerfassung eine Rolle spielen. Als Beispiele sind etwa die zeitliche Synchronisation der Sensoren, ein Offset der Entfernungsbestimmung oder der Spiegelablenkung sowie Ungenauigkeiten bei der Anbringung der Sensoren am Sensorträger zu nennen. Aufgrund dieser Fehlerursachen wurden verschiedene Verfahren entwickelt, die auf eine Kalibrierung des Sensorsystems abzielen und sich somit auf die direkte Georeferenzierung der Laserpunkte auswirken. BURMAN (2000) betrachtet hierzu Gradienten der Höhen- und Intensitätswerte überlappender Streifen zur Bestimmung der Fehlaustrichtung von INS und Lasersensor. KAGER (2004) schlägt eine Ausgleichung anhand homologer Flächen zur Korrektur der äußeren und inneren Sensororientierung vor. Eine rigorose Vorgehensweise zur Selbstkalibrierung des INS/GPS/Laser-Sys-

tems ist von SKALLOUD & LICHTI (2006) beschrieben worden. Die Autoren optimieren die relative Sensorausrichtung dahingehend, dass Ebenen durch die dort gemessenen Punkte auch möglichst eben repräsentiert werden.

Zur Kalibrierung des Sensorsystems müssen andere Ursachen für einen Versatz der Datensätze möglichst ausgeschlossen werden. Systematische Fehler ließen sich ansonsten z. B. kaum von GPS-Positionierungsfehlern separieren. Wenn wie in unserem Fall eine eigene GPS-Bodenstation für Differential-GPS fehlt, können die gemessenen Sensorpositionen trotz optimal eingerichteter Sensorparameter um mehrere Meter abweichen. Die GPS-Rohdaten lassen sich zwar noch nachträglich durch Korrekturdaten des Satellitenpositionierungsdienstes der deutschen Landesvermessung (SAPOS) berichtigen, dies ist jedoch nicht praktikabel, wenn die koregistrierten Daten möglichst sofort vorliegen sollen (z. B. im Rahmen einer Überwachungsaufgabe).

Die Justierung des Laserscanners in Bezug auf die Navigationssensoren (oftmals engl. „boresight calibration“ genannt) ist nicht Thema der hier vorgestellten Arbeiten. Wir gehen im Folgenden vielmehr davon aus, dass systematische Fehler der Sensoren bereits im Vorfeld erfasst und korrigiert wurden und ein verbleibender Versatz andere Ursachen hat. Dies ist auch dann von Interesse, wenn z. B. mehrere baugleiche Sensoren auf verschiedenen Sensorträgern für die Datenaufzeichnung zum Einsatz kommen oder aktuell erfasste Daten mit bereits vorliegenden 3D-Punktwolken oder Stadtmodellen verglichen werden sollen. Man kann hierbei zwar davon ausgehen, dass die Einzeldatensätze sich aufgrund der direkten Georeferenzierung bereits grob in Position befinden, eine Feinregistrierung jedoch noch notwendig ist, um eine konsistente Gesamtdatenbasis zu erhalten. Diese Vorgehensweise setzt also nicht am Sensorsystem, sondern an den Punktwolken an.

### 1.3 Übersicht über die Vorgehensweise

Als Standardverfahren zur Koregistrierung von Punktmengen wird oft der ICP-Algorithmus

mus (Iterative Closest Point) von BESL & MCKAY (1992) verwendet. Aufgrund der beschriebenen Abschattungen kann das ICP-Verfahren jedoch nicht ohne weiteres auf die hier vorliegenden Punktwolken angewendet werden, da der Algorithmus anfällig für nicht-überlappende Bereiche in den Datensätzen ist (RABBANI et al. 2007). Falsche Zuordnungen aufgrund fehlender Punkte (Verdeckungen) können zu schlechten Resultaten führen, wenn die ICP-Iterationen dadurch in ein lokales Minimum der Fehlerfunktion hineinlaufen. Außerdem ist eine punktbasierte Zuordnung bei den betrachteten Datensätzen mit mehreren Millionen Punkten in den Überlappungsbereichen nicht sehr effizient. Daher zielt unsere Vorgehensweise zunächst darauf ab, geometrische Strukturen in den Datensätzen ausfindig zu machen, die für eine stabile und schnelle gegenseitige Registrierung der Datensätze geeignet sind.

In urbanem Gebiet hängt bei Schrägsicht von oben die Sichtbarkeit von Häuserdächern im Vergleich zu Fassaden und Bodenpunkten am wenigsten von der Flugrichtung ab. Aufgrund der unterschiedlichen Blickwinkel des Laserscanners auf Dachflächen ist die dortige Punktdichte in den verschiedenen Datensätzen aber sehr unterschiedlich. Wir passen daher zunächst mit einem robusten Schätzverfahren (RANSAC) Ebenen in die Daten ein, um so die Dachflächen geometrisch zu beschreiben. Nun ist es vergleichsweise einfach, übereinstimmende Dachflächen in den grobregistrierten Datensätzen ausfindig zu machen. Zur Bestimmung der Parameter zur Feinregistrierung (Translation, Drehung) werden aufbauend auf den Ebenenkorrespondenzen zwei Methoden untersucht. Zum einen lassen sich Abstände der Ebenenschwerpunkte zur jeweils homologen Ebene des anderen Datensatzes im Rahmen einer Ausgleichsrechnung minimieren. Zum anderen schneiden sich jeweils drei nicht-parallele Dachebenen in einem virtuellen 3D-Punkt. Im Falle homologer Ebenen in verschiedenen Datensätzen korrespondieren auch die jeweiligen Schnittpunkte miteinander, so dass die Feinregistrierung anhand der einander implizit zugeordneten virtuellen 3D-Punkte durchgeführt werden kann.

## 2 Verwendete Methoden und vergleichbare Arbeiten

In den letzten Jahren sind sehr viele Artikel zur Koregistrierung von Punktmengen veröffentlicht worden. Seit BESL & MCKAY (1992) den ICP-Algorithmus vorgestellt haben, hat sich dieses Verfahren als Standardlösung für das Registrierungsproblem etabliert. In zahlreichen Modifikationen des ICP-Verfahrens wurde versucht, dessen Robustheit, Performanz und/oder Genauigkeit zu verbessern (vgl. auch HEBEL & STILLA 2007). Auch unser Ansatz baut teilweise darauf auf: Wir umgehen zwar das Problem der iterativen Punktkorrespondenzsuche, verwenden aber die in vielen ICP-Varianten eingesetzte Methode von ARUN et al. (1987) zur Bestimmung der Transformationsparameter. Da Daten von Laserscannern unregelmäßig im Raum verteilt sind, werden von einigen Autoren die Verwendung von Dreiecksvermaschungen (z. B. MAAS 2000) oder k-d Suchbäume (z. B. SKALLOUD & SCHAEER 2007) vorgeschlagen. Wir wollen für die Koregistrierung einerseits Dachflächen segmentieren, deren Normalenrichtungen immer eine Vertikalkomponente aufweisen, und sind andererseits am Herausfiltern von Fassadenpunkten interessiert. Daher bietet sich für uns der einfacher zu realisierende Ansatz an, ein der Punktdichte angepasstes regelmäßiges Bodengitter zugrunde zu legen und pro Rasterfläche nur den höchsten vorkommenden Messpunkt zu betrachten. Diese Datenstruktur ist schnell erstellt und für Suchoperationen und die Untersuchung von Nachbarschaften sehr effizient nutzbar. Einzelne Störungen z. B. durch Dachantennen werden dadurch zwar betont, diese fallen aber bei der anschließenden Ebenenanpassung mit RANSAC nicht ins Gewicht.

Ein Unterpunkt unseres Ansatzes ist die Segmentierung ebener Flächen in den Punktwolken. Hierfür wurden bereits unterschiedlichste Techniken veröffentlicht. Vergleiche verschiedener Herangehensweisen sind in (HOOVER et al. 1996, GEIBEL & STILLA 2000) zu finden. Einige Autoren sind daran interessiert, neben Ebenen z. B. auch sphärische, zylindrische oder kegelförmige Objekte zu segmentieren. In (RABBANI et al. 2007) werden zwei Methoden beschrieben, Modelle durch Minimie-



rung von Fehlerquadraten an die Daten anzupassen. Dagegen verwenden VOSSELMAN et al. (2004) die dreidimensionale Hough-Transformation zur strukturellen Analyse der Punktmengen. Unter den verfügbaren Verfahren hat der RANSAC-Algorithmus von FISCHLER & BOLLES (1981) einige Vorteile bei der Extraktion von festgelegten Formen aus den Datensätzen. Wir verwenden das RANSAC-Verfahren ähnlich wie SCHNABEL et al. (2006) zur robusten Schätzung von Ebenenparametern. Außerdem liefert der sich ergebende Anteil von Outliern eine wichtige Information darüber, ob man es an der vorliegenden Position im Datensatz eher mit planaren Strukturen (z. B. Gebäude, Straßen) oder unregelmäßig geformten Objekten (z. B. Vegetation) zu tun hat. Die Streuung der diskreten Messpunkte ist im letztgenannten Fall hoch, diese sollten daher nicht für Zuordnungen berücksichtigt werden.

Die Verwendung ebener Strukturen zur Koregistrierung von Laserstreifen ist prinzipiell nicht neu und wurde bereits an anderen Stellen vorgeschlagen (z. B. KAGER 2004). Ähnliche Probleme stellen sich auch beim terrestrischen Laserscanning und wurden dort z. B. von DOLD & BRENNER (2006) untersucht. Bei beliebiger Wahl der Standorte des terrestrischen Laserscanners tritt vor allem das Problem der Zuordnung homologer Ebenen auf. In unserem Fall liegen die Daten bereits grobregistriert vor, so dass speziell zur Feinjustierung andere Methoden angewendet werden können.

Im Folgenden werden zunächst zwei bei der Prozessierung verwendete Verfahren kurz erläutert. Für einen tieferen Einblick sei auf die Originalartikel (FISCHLER & BOLLES 1981, ARUN et al. 1987) verwiesen.

## 2.1 *Random Sample Consensus (RANSAC)*

Beim RANSAC-Verfahren (RANDOM SAMPLE CONSENSUS), wie es von FISCHLER & BOLLES (1981) beschrieben wird, handelt es sich um eine Technik zur numerischen Schätzung von Parametern eines mathematischen Modells, welches einer beobachteten Menge von Messwerten unterliegt. Die Anwendung des RAN-

SAC-Schätzverfahrens ist vor allem dann sinnvoll, wenn die Daten einen hohen Anteil an Ausreißern enthalten. Im Gegensatz zur klassischen Methode, unter Verwendung aller Datenpunkte eine Minimierung der Fehlerquadrate herbeizuführen (z. B. lineare Regression), wird beim RANSAC-Verfahren eine minimale Teilmenge („Sample“) der Daten gewählt, mit der die Parameter des Modells geschätzt werden können.

Soll an eine Menge von dreidimensionalen Datenpunkten eine Ebene angepasst werden, so benötigt man als minimale Auswahl drei nicht-kollineare Punkte, um die zugehörigen Ebenenparameter zu schätzen. Da die Menge auch Punkte enthalten kann, die sich nicht durch die zu bestimmende Ebene beschreiben lassen (Outlier), wird die Bestimmung einer Regressionsebene für alle Punkte im Allgemeinen nicht zum gewünschten Ergebnis führen. RANSAC schätzt die Ebenenparameter nur anhand der zuvor bestimmten Konsensmenge der Inlier, unter der Annahme, dass die Wahrscheinlichkeit, bei zufälliger Entnahme von drei Datenpunkten nur Inlier anzutreffen, hinreichend hoch ist.

Zur Bestimmung der Ebenenparameter wird also eine zufällige Auswahl von drei nicht kollinearen Punkten ( $\mathbf{p}_i$ ,  $\mathbf{p}_j$ , und  $\mathbf{p}_k$ ) aus der Datenmenge gewählt. Der Normalenvektor  $\mathbf{n}_0$  der resultierenden Ebene ist dann gegeben durch  $\mathbf{m} = (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j) \times (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_k)$ ,  $\mathbf{n}_0 = \mathbf{m}/|\mathbf{m}|$ , und mit  $(\mathbf{x} - \mathbf{p}_i) \cdot \mathbf{n}_0 = 0$  ist die Hessesche Normalform der Ebene gegeben. Alle übrigen Datenpunkte werden dann hinsichtlich ihres Abstands zu dieser Ebene überprüft, der für jeden Punkt  $\mathbf{p}$  als  $d = |(\mathbf{p} - \mathbf{p}_i) \cdot \mathbf{n}_0|$  berechnet wird. Abhängig von ihrem Abstand  $d$  und einer Toleranz  $\varepsilon$  werden nun alle Punkte der Datenmenge als Inlier oder als Outlier bewertet. Die Prozedur der zufälligen Auswahl dreier Punkte wird mehrmals wiederholt, wobei die Anzahl der benötigten Versuche aus einer Schätzung der Inlier-Rate und einer Zuverlässigkeitsanforderung abgeleitet werden kann. Die im Verlauf hinsichtlich der Größe und des mittleren Fehlers beste gefundene Inlier-Menge wird letztlich für die Bestimmung einer Regressionsebene verwendet.



## 2.2 Verfahren von Arun, Huang und Blostein zur Transformationsbestimmung

Zur Bestimmung einer Transformation, welche beim Vorliegen von Korrespondenzen eine Punktmenge zu einer anderen Punktmenge ausrichtet, sind verschiedene Verfahren bekannt. Man muss entscheiden, welche Freiheitsgrade bei der gesuchten Transformation zugelassen werden und welche Zielfunktion dadurch optimiert werden soll. Oft ist man daran interessiert, die Summe der quadrierten euklidischen Abstände zwischen korrespondierenden Punkten zu minimieren. Zur verzerrungsfreien Umrechnung zwischen dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystemen wird in der Geodäsie häufig die Helmert-Transformation eingesetzt, die neben Translation und Drehung auch eine Maßstabsänderung bestimmt. Bei den hier betrachteten Daten liefert der Lasersensor bereits globale 3D-Koordinaten, so dass kein Skalierungsfaktor zwischen den Einzeldatensätzen vorliegt. Eine fehlerhafte Kalibrierung des Sensorsystems könnte zu Verzerrungen innerhalb der Punktmenge führen. Da die Relativorientierung der Sensoren aber bereits korrigiert wurde (vgl. Abschnitt 1.2), gehen wir von einer rein rigiden Transformation zur Koregistrierung der Punktwolken aus.

Zur Berechnung existiert ein Verfahren von ARUN et al. (1987), das wegen der vergleichsweise einfachen Implementierung oft innerhalb des ICP-Verfahrens zur Ausrichtung zweier Punktmenge verwendet wird. BESL & MCKAY (1992) selbst setzten zur geschlossenen Lösung der Transformationsbestimmung Quaternionen ein. Dagegen verwenden ARUN et al. (1987) die Singulärwertzerlegung einer  $3 \times 3$  Matrix, wie sie im Folgenden beschrieben wird:

Sei  $M = \{m_i | i = 1, \dots, n\}$  eine Menge von 3D-Punkten, denen Datenpunkte einer gleichmächtigen, zweiten 3D-Punktmenge  $D = \{d_i | i = 1, \dots, n\}$  zugeordnet sind, und zwar so, dass jeweils  $m_i$  mit  $d_i$  korrespondiert. Zunächst werden die Schwerpunkte dieser Punktmenge berechnet:

$$c_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i, \quad c_d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (1)$$

Die Punktmenge  $M$  und  $D$  werden anschließend mit ihren Schwerpunkten  $c_m$  und  $c_d$  auf den Ursprung des Koordinatensystems verschoben:

$$\begin{aligned} \bar{M} &= \{\bar{m}_i | \bar{m}_i = m_i - c_m, i = 1, \dots, n\}, \\ \bar{D} &= \{\bar{d}_i | \bar{d}_i = d_i - c_d, i = 1, \dots, n\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Danach wird eine  $3 \times 3$  Matrix  $H$  definiert als

$$H = \sum_{i=1}^n \bar{d}_i \bar{m}_i^T \quad (3)$$

Die Singulärwertzerlegung dieser Matrix  $H = UAV^T$  führt zur optimalen Drehung  $R$  und zur optimalen Translation  $t$ , welche den Datensatz  $D$  so transformieren, dass im Anschluss die Summe der quadrierten euklidischen Abstände zwischen zugeordneten Punkten minimal ist.

$$R = UV^T, \quad t = c_m - Rc_d \quad (4)$$

Der Beweis hierfür wird in (ARUN et al. 1987) gegeben. Nach der Bestimmung von  $R$  und  $t$  kann der gesamte Datensatz  $D$  entsprechend  $Rd_i + t$  gedreht und verschoben werden.

## 3 Filterung der Laserpunkte

### 3.1 Vorverarbeitung der Daten

Der erste Schritt des Ansatzes ist eine Ausdünnung der Punktmenge in der Form, dass nur noch Strukturen erhalten bleiben, die für eine gegenseitige Koregistrierung geeignet sind. Bei der verwendeten Sensorkonfiguration mit einem flugzeuggetragenen Laserscanner in Schrägsicht sind dies am ehesten Messpunkte auf den Dächern von Gebäuden. Daher wird zunächst eine Vorklassifizierung der gemessenen 3D-Punkte hinsichtlich der Zugehörigkeit zu den Klassen „Fassade“, „Boden“, „Vegetation“ oder „Dach“ durchgeführt.

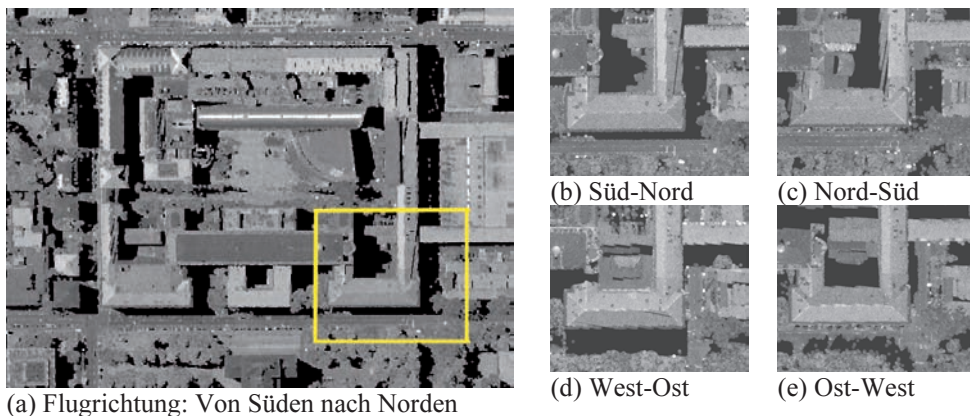
Ein allgemeines Problem bei unregelmäßig verteilten 3D-Punkten ist die Verwaltung der Daten in einer geeigneten Datenstruktur. Diese wird oft durch eine Baum-Struktur wie Octree oder k-d Baum realisiert. Da wir für die Koregistrierung primär an den Dächern, nicht

aber an den Fassaden interessiert sind, ist für uns ein regelmäßiges, ebenes Datenraster ausreichend. Hierzu werden alle Punkte zunächst einem zweidimensionalen, horizontalen Bodengitter zugeordnet, in dem die Zellgröße in etwa dem durchschnittlichen Punktabstand entspricht (bei unseren Daten typischerweise 0.5 m). Trotzdem kann eine Zelle dieses Arrays auch gar keine oder mehrere 3D-Punkte erfassen, insbesondere dort, wo sich Fassadenpunkte befinden. Bei diesem Vorgehen wird keine Interpolation oder Projektion der Daten durchgeführt, es handelt sich um eine 2D-Sortierung der 3D-Daten, die für die Datenorganisation und für Nachbarschaftsoperationen verwendet werden kann.

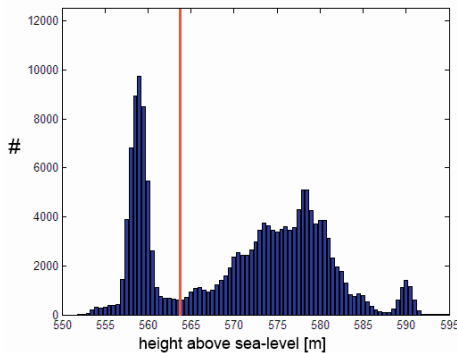
Wenn man nun pro Zelle nur den höchsten vorkommenden Punkt betrachtet, werden Punkte entlang der Fassaden herausgefiltert, aber auch z. B. Äste unter Baumkronen oder Baumstämme. Man kann das sich ergebende 2D-Gitter mit dem jeweils höchsten pro Zelle vorkommenden 3D-Punkt nun auch als Bild darstellen. Abb. 2 zeigt hierzu ein Beispiel mit gleichzeitiger Verwendung der gemessenen Amplitudenwerte der Laserpulse zur Grauwertdarstellung der einzelnen Pixel. Die verschiedenen Scanrichtungen sind in Abb. 2b–2e anhand der Position der Schatten zu erkennen.

### 3.2 Segmentierung des Bodens

Bei der dargestellten Datenerfassung in Schrägsicht werden im städtischen Gebiet viele Bodenpunkte verdeckt. Naheliegender ist es daher, diese Punkte generell aus den Betrachtungen zur Koregistrierung auszuschließen, was gleichzeitig zu einer deutlichen Reduktion der Datenmenge führt. Als nächster Schritt wird daher eine Segmentierung der Bodenpunkte durchgeführt. Für diese Aufgabe existieren fortgeschrittene Verfahren, die für viele denkbare Geländeformen anwendbar sind (z. B. SITHOLE & VOSSELMAN 2004). Da die von uns betrachteten Datensätze in relativ ebenem Gelände aufgenommen wurden und die Ergebnisse der Bodensegmentierung nicht in eine Weiterverarbeitung eingehen, verwenden wir zur Segmentierung ein für die Zielsetzung hinreichendes und einfaches Verfahren. Hierzu analysieren wir lokale Histogramme der Höhenwerte aus der zuvor generierten Datenmatrix, jeweils in einer geeignet großen Umgebung von z. B. 50 Metern um die jeweilige Position. Jedes lokale Höhenhistogramm zeigt eine multimodale Verteilung. Zur automatischen Bestimmung des Bodenniveaus wird jeweils das erste Maximum des Histogramms gesucht, das in einem Bereich um den entsprechenden Höhenwert eine signifikante Anzahl von Datenpunkten beinhaltet. Oberhalb dieses Maximums kann dann ein Schwellwert gesetzt werden, der darüber bestimmt, ob Punk-



**Abb. 2:** Verteilung der jeweiligen Punktwolke auf ein horizontales Gitter, Darstellung als Grauwertbild und Vergleich der vier Datensätze.



(a)



(b)

**Abb. 3:** (a) Bestimmung des Schwellwertes zur Bodensegmentierung anhand eines lokalen Höhenhistogramms, (b) verbleibende Punkte über dem Bodenniveau.

te zum Boden gezählt werden oder nicht. Da diese Schwellwertbestimmung auch zu fehlerhaften Schätzungen führen kann, wird zusätzlich ein Medianfilter auf alle gefundenen Schwellwerte im zweidimensionalen Raster angewendet. Abb. 3a zeigt ein Beispiel für eine lokale Verteilung der Höhenwerte, worin der dort gefundene Schwellwert als rote Linie gekennzeichnet ist. Abb. 3b zeigt beispielhaft die für einen der Datensätze verbleibenden Punkte nach dem Herausfiltern der Bodenpunkte.

### 3.3 Segmentierung planarer Strukturen (Dachflächen)

Die verbleibenden Datenpunkte, wie sie als Beispiel in Abb. 3b zu sehen sind, repräsentieren nun hauptsächlich noch die Gebäudedächer, aber auch Vegetation wie etwa Bäume oder Gebüsch. Mit der in diesem Abschnitt dargestellten Vorgehensweise wird erstens versucht, zwischen diesen beiden Klassen zu unterscheiden und zweitens, im Fall einer gefundenen Dachfläche auch gleichzeitig die Ebenenparameter zu bestimmen. Dazu wird der in Tab. 1 in prozeduraler Form dargestellte Algorithmus verwendet (nächste Seite).

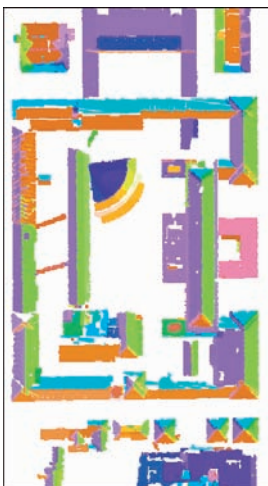
Es handelt sich um ein iteratives Verfahren, bei dem in jedem Durchlauf zunächst eine noch nicht behandelte Position innerhalb der Datenmatrix zufällig gewählt wird („Datenmatrix“ bezeichnet hierbei das horizontale

Bodengitter mit jeweils zugeordnetem höchsten 3D-Punkt, siehe Abschnitt 3.1). Dann wird mittels RANSAC-Verfahren (vgl. Abschnitt 2.1) versucht, an diese Position mit den Datenpunkten aus der unmittelbaren Nachbarschaft eine Ebene anzupassen. Falls dies nicht gelingt, also die Anzahl der Outlier immer sehr hoch ist, wird diese Stelle in der Datenmatrix als „Vegetation“ klassifiziert. Anderenfalls wird in den Schritten (9) bis (11) mit einem Füllverfahren nach weiteren Punkten gesucht, die die gefundene Ebene stützen, d. h. die Ebene wird soweit wie möglich ausgedehnt. Mit den so gefundenen Punkten kann dann die Ebenenanpassung wiederholt werden, um das Ergebnis schrittweise zu verbessern. Dieses Vorgehen setzt sich dann an anderen Positionen im Datensatz fort, bis alle Datenpunkte bewertet sind. Abb. 4a zeigt beispielhaft die so detektierten Dachflächen für einen der Datensätze, wobei die verbleibenden Datenpunkte anhand der Normalenrichtung eingefärbt wurden. Das Gesamtergebnis der automatischen Vorklassifizierung ist in Abb. 4b zu sehen, wobei hier die Farben die Zugehörigkeit zu „Boden“, „Vegetation“ oder „Dach“ kennzeichnen.

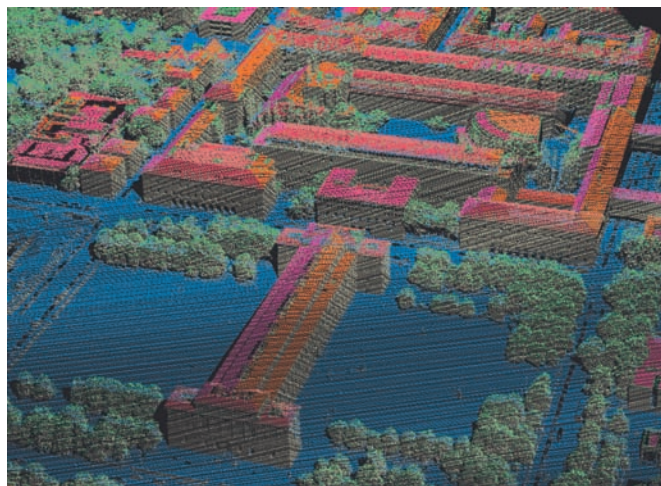
In einer Kategorisierung von Segmentierungsverfahren für Entfernungsbilder (z. B. HOOVER et al. 1996) lässt sich dieses Vorgehen als typisches „region growing“-Verfahren einstufen. Durch die Verwendung des RANSAC-Ansatzes bestehen Gemeinsamkeiten mit den von SCHNABEL et al. (2006) publizierten Arbei-

**Tab. 1:** Verfahren zur lokalen Anpassung von Ebenen an die Punktmengen.

	<p>(1) Wähle eine bislang noch nicht prozessierte Position <math>(i, j)</math> zufällig unter den besetzten Zellen der Datenmatrix aus.</p> <p>(2) Fasse Punkte in einer lokalen Umgebung dieser Position zur Menge <math>S</math> zusammen.</p> <p>(3) Setze den Zähler <math>k</math> auf Null.</p>
	<p>(4) Falls <math>S</math> genügend Punkte enthält (z. B. mindestens sechs), fahre fort mit (5), andernfalls markiere diese Position als „Vegetation“ und gehe zu (14).</p> <p>(5) Erhöhe den Zähler <math>k</math> um Eins.</p> <p>(6) Führe eine RANSAC-basierte Ebenenanpassung an die Punkte in <math>S</math> durch.</p> <p>(7) Falls der Anteil der gefundenen Inlier gering ist, markiere diese Position als „Vegetation“ und gehe zu (14).</p> <p>(8) Bestimme die Hessesche Normalform <math>(\mathbf{x}-\mathbf{p}) \cdot \mathbf{n}_0 = 0</math> der Ebene anhand der Inlier und lege die Position <math>(i, j)</math> auf einem Stapel ab (LIFO-Datenstruktur).</p>
Region growing	<p>(9) Entnehme das oberste Element <math>(u, v)</math> des Stapels.</p> <p>(10) Prüfe Positionen in einer Nachbarschaft von <math>(u, v)</math>, die noch nicht diesbezüglich überprüft wurden, ob sie Datenpunkte <math>\mathbf{x}</math> enthalten, die bezüglich des Abstandes <math> (\mathbf{x}-\mathbf{p}) \cdot \mathbf{n}_0 </math> die gefundene Ebene stützen. In diesem Fall lege die entsprechenden Positionen auf dem Stapel ab und füge die zugehörigen Datenpunkte einer neuen Menge <math>S'</math> hinzu.</p> <p>(11) Solange der Stapel nicht leer ist, wiederhole ab (9), andernfalls gehe zu (12).</p>
	<p>(12) Falls der Zähler <math>k</math> das vordefinierte Maximum erreicht hat (z. B. drei Durchläufe) und <math>S'</math> genügend Elemente enthält, markiere alle zu Punkten aus <math>S'</math> gehörenden Positionen als „prozessiert“ und bestimme die Regressionsebene zu <math>S'</math>. Speichere den Schwerpunkt von <math>S'</math> und den Normalenvektor der Regressionsebene und gehe zu (14), ansonsten gehe zu (13).</p> <p>(13) Gehe mit der neuen Menge <math>S:=S'</math> zurück zu (4).</p>
	<p>(14) Wiederhole ab Schritt (1) bis alle Datenpunkte markiert sind.</p>



(a)



(b)

**Abb. 4:** (a) Segmentierte Dachflächen, eingefärbt entsprechend Normalenrichtung, (b) Ergebnis der Vorklassifikation, Boden (blau), Vegetation (grün), Dächer (rötlich), Rest (grau).



ten. Eine Besonderheit ist die nichtdeterministische Vorgehensweise, wodurch sich nach und nach an verschiedenen Stellen des Datensatzes Strukturen herauskristallisieren. Das bringt den Vorteil, dass man den Ablauf vorzeitig abbrechen kann, z. B. wenn genügend Flächen für die Koregistrierung gefunden wurden.

Man könnte das hier beschriebene Verfahren zunächst unabhängig auf alle vorhandenen Datensätze anwenden. Danach würde aber keine Information über korrespondierende Flächen in den Punktwolken vorliegen. Die randomisierte Abarbeitung aller Punkte wird daher zunächst nur an einem Datensatz durchgeführt, der hierbei als Referenzdatensatz gilt. Bei den anderen Datensätzen wird wie folgt vorgegangen: Anstelle der zufälligen Auswahl von Positionen der Datenmatrix in Schritt (1) werden nur die Positionen der Schwerpunkte von bereits gefundenen Flächen des Referenzdatensatzes als Ausgangspunkte für die Ebenenanpassung gewählt. Da man davon ausgehen kann, dass die einzelnen Datensätze bereits grob registriert sind, ist die Wahrscheinlichkeit groß, hier gerade die jeweils homologe Ebene im anderen Datensatz wiederzufinden. Um sicher zu gehen, dass so gefundene Ebenen mit den Referenzflächen korrespondieren, wird zusätzlich der Winkel zwischen den Normalenvektoren überprüft und ebenso der Flächeninhalt, z. B. der konvexen Hülle der gefundenen Punktmenge. Wenn sich hierbei gute Übereinstimmungen zeigen, wird dieses

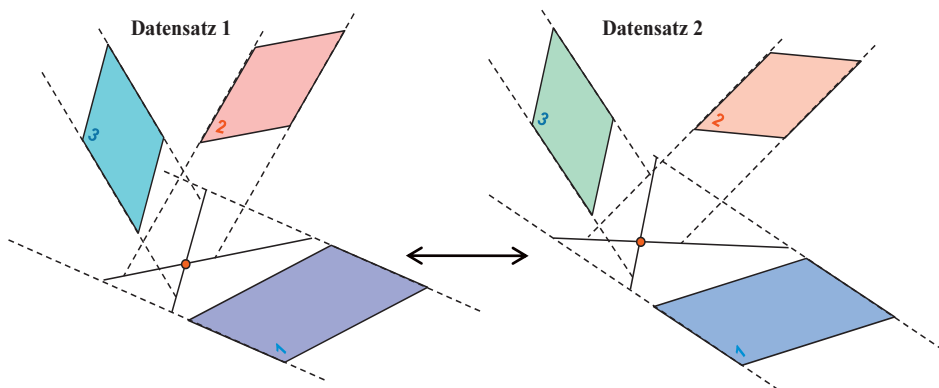
Paar von Ebenen als korrespondierend akzeptiert.

## 4 Koregistrierung der Punktwolken

Es liegen nun mit der Vorverarbeitung aus Abschnitt 3.3 Informationen über jeweils korrespondierende Ebenen des Referenzdatensatzes und der dazu auszurichtenden Punktmengen vor. Es bezeichne  $P_M$  den Referenzdatensatz und  $P_D$  die jeweils andere Punktmenge, die zu  $P_M$  koregistriert werden soll.

### 4.1 Erste Methode (Schnittpunkte)

Es seien  $E_i$ ,  $E_j$  und  $E_k$  drei Ebenen, die zum Datensatz  $P_M$  gehören, und  $(\hat{E}_i, \hat{E}_j, \hat{E}_k)$  die entsprechenden Ebenen aus  $P_D$ . Wenn  $z$  die Anzahl der paarweise korrespondierenden Ebenen ist, so gibt es insgesamt  $(1/6) \cdot z \cdot (z-1) \cdot (z-2)$  Möglichkeiten zur Auswahl eines Ebenentripels. So groß ist folglich auch die Anzahl möglicher Schnittpunkte dieser. Da die Ebenenkorrespondenzen bekannt sind, können auch die sich ergebenden Schnittpunkte einander zugeordnet werden. Abb. 5 illustriert den Vorgang der gleichzeitigen Schnittpunktbestimmung in zwei Datensätzen. Um zu vermeiden, dass nahezu parallele Ebenen geschnitten werden, wird vor der jeweiligen Berechnung der Schnittpunkte überprüft, ob die



**Abb. 5:** Je drei nicht-parallele Ebenen (Dachflächen) schneiden sich in einem 3D-Punkt. Die entsprechenden Ebenen im anderen Datensatz führen zu einer Schnittpunktkorrespondenz.



Normalenvektoren der Ebenen hinreichend voneinander abweichen. Man kann dazu z. B. das Volumen des durch die Normalenvektoren  $\mathbf{n}_i$ ,  $\mathbf{n}_j$  und  $\mathbf{n}_k$  aufgespannten Spats betrachten, welches gerade die Determinante der durch die drei Vektoren gebildeten Matrix ist, und fordern:

$$|\det(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j, \mathbf{n}_k)| \geq s \quad (5)$$

Der Schwellwert  $s$  wird dabei z. B. auf einen Wert größer als 0,75 gesetzt, um nur möglichst schiefstehende sich schneidende Ebenen zuzulassen, was für die numerische Bestimmung des Schnittpunktes günstiger ist. Zusätzlich kann gefordert werden, dass

$$|\det(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j, \mathbf{n}_k) - \det(\hat{\mathbf{n}}_i, \hat{\mathbf{n}}_j, \hat{\mathbf{n}}_k)| \leq \varepsilon, \quad \varepsilon > 0 \quad (6)$$

mit einem  $\varepsilon$  nahe bei Null, um so Ausreißer bei den Schnittpunktpaarungen zu vermeiden, da man so ein weiteres mal sicherstellen kann, nur jeweils zugehörige Ebenen aus den beiden Datensätzen für die Schnittpunktbestimmung genutzt zu haben. Wir verwenden die hier berechneten Kenngrößen nur zum Ausschluss einzelner Punktpaarungen, jedoch könnte diese Bewertung in Erweiterung des Verfahrens auch zu einer kontinuierlichen Gewichtung der Schnittpunkte dienen.

Mit den sich ergebenden Mengen  $M$  und  $D$  von Schnittpunkten innerhalb Referenzdatensatz  $P_M$  und Datensatz  $P_D$  sowie den gleichzeitig bekannten Zuordnungen zwischen Elementen aus  $M$  und  $D$  kann nun das in Abschnitt 2.2 beschriebene Verfahren von ARUN et al. (1987) zur Koregistrierung der Punktwolken angewendet werden. Man erhält dann eine Rotation  $R$  und eine Translation  $\mathbf{t}$ , durch die Datensatz  $P_D$  an  $P_M$  ausgerichtet werden kann. Dieses Vorgehen wird für alle vorhandenen Punktmengen  $P_D$  wiederholt, um so das Gesamtergebn einer koregistrierten Punktwolke zu erhalten.

## 4.2 Zweite Methode (Ebenenzusammenführung)

Es sei  $E_M$  eine Ebene, die zum Datensatz  $P_M$  gehört, und  $E_D$  die entsprechende Ebene aus  $P_D$ . Die Ebene  $E_M$  ist in Schritt (12) des Seg-

mentierungsverfahrens in Abschnitt 3.3 bestimmt worden und durch den Schwerpunkt  $\mathbf{c}_M$  der Menge  $S'$  zusammen mit einem Normalenvektor  $\mathbf{n}_M$  beschrieben. Für die Ebene  $E_D$  gilt entsprechendes mit dem Stützpunkt  $\mathbf{c}_D$  und  $\mathbf{n}_D$  als Normalenvektor. In Abb. 6 ist dies illustriert. Da es sich um homologe Ebenen handelt, sollte der Punkt  $\mathbf{c}_D$  den Abstand Null zur Ebene  $E_M$  besitzen, auch sollten die Normalenvektoren nach Festlegung auf positive  $z$ -Komponenten gleich sein. Um dies im Rahmen der Koregistrierung zu erreichen, wird eine rigide Transformation  $(R, \mathbf{t})$  der Punktwolke  $P_D$  durchgeführt, deren Parameter noch zu bestimmen sind. Wir erhalten damit für ein korrespondierendes Ebenenpaar folgende Bedingungen:

$$\begin{aligned} (R \cdot \mathbf{c}_D + \mathbf{t} - \mathbf{c}_M) \cdot \mathbf{n}_m &= 0 \\ (R \cdot \mathbf{n}_D) \cdot \mathbf{n}_m &= 1 \end{aligned} \quad (7)$$

Da es sich bei der Rotation  $R$  aufgrund der direkten Georeferenzierung der Punktwolken nur um eine Drehung mit kleinem Winkel handeln kann, lässt sich (7) durch folgende Näherung linearisieren:

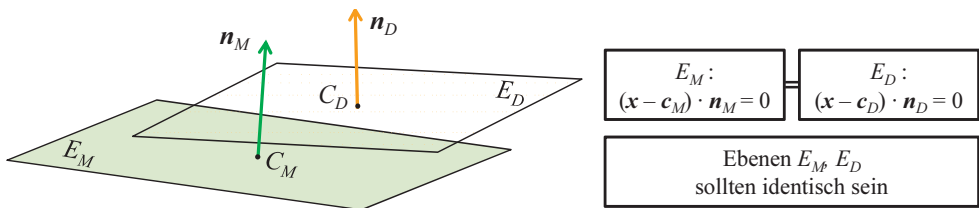
$$R \approx \begin{pmatrix} 1 & -\alpha_3 & \alpha_2 \\ \alpha_3 & 1 & -\alpha_1 \\ -\alpha_2 & \alpha_1 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Zusammen mit den Komponenten der Translation  $\mathbf{t} = (t_1, t_2, t_3)$  sind also sechs Parameter bei zwei Gleichungen pro Ebenenpaar in einem linearen Gleichungssystem zu bestimmen. Die Gleichung (7) nimmt aufgelöst nach den sechs Unbekannten folgende Gestalt an:

$$\begin{pmatrix} c_{D2}n_{M3} - c_{D3}n_{M2} & c_{D3}n_{M1} - c_{D1}n_{M3} \\ n_{D2}n_{M3} - n_{D3}n_{M2} & n_{D3}n_{M1} - n_{D1}n_{M3} \\ c_{D1}n_{M2} - c_{D2}n_{M1} & n_{M1} & n_{M2} & n_{M3} \\ n_{D1}n_{M2} - n_{D2}n_{M1} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix}^T \quad (9)$$

$$= \begin{pmatrix} (c_{M1} - c_{D1})n_{M1} + (c_{M2} - c_{D2})n_{M2} + (c_{M3} - c_{D3})n_{M3} \\ 1 - n_{D1}n_{M1} - n_{D2}n_{M2} - n_{D3}n_{M3} \end{pmatrix}$$

Zur Bestimmung der Parameter  $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, t_1, t_2, t_3)$  werden bei dieser Methode drei Ebenenpaare benötigt. Da in der Praxis wesentlich mehr Korrespondenzen vorhanden sind, er-



**Abb. 6:** Räumliche Lage zweier homologer Ebenen vor der Ausrichtung der Datensätze.

gibt sich ein überbestimmtes lineares Gleichungssystem. Die beste Lösung hinsichtlich einer Minimierung der euklidischen Norm des Residuenvektors erhält man durch Lösung des Normalgleichungssystems oder mit Hilfe einer QR-Zerlegung der Koeffizientenmatrix, die z. B. mit dem Verfahren nach HOUSEHOLDER (1958) berechnet werden kann.

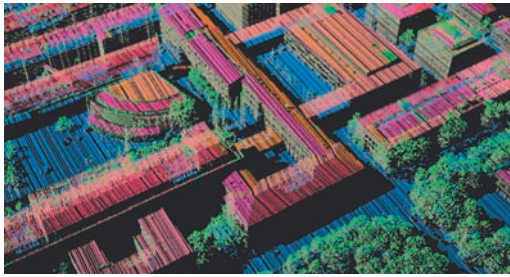
#### 4.3 Anwendung auf exemplarische Daten

In den nachfolgenden Abbildungen zeigen wir ein Beispiel eines Verarbeitungsergebnisses. In Abb. 7 sind Ausschnitte der vier unabhängig voneinander aufgezeichneten Datensätze des Testgebiets TUM zu sehen, jeweils in Schrägsicht aus einer anderen Richtung abgetastet und mit Einzelpunkten vorklassifiziert entsprechend der Methoden aus den Abschnitten 3.1 bis 3.3. Datensatz 1 dient als Referenzdatensatz. Die anderen drei Punktwolken werden durch die jeweils berechnete Rotation  $R$  und Translation  $t$  zum Referenzdatensatz ausgerichtet. In der rechten Spalte ist dieses Ergebnis in Form der Drehwinkel in Grad zusammen mit dem berechneten Translationsvektor aufgelistet. Zur Bewertung der zwei verwendeten Methoden aus Abschnitt 4.1 bzw. 4.2 werden vor und nach der Koregistrierung Kenngrößen ermittelt, die in je einem der Verfahren minimiert wurden. Dies sind zum einen der mittlere Abstand  $d_1$ , der Ebenenschnittpunkte aus Abschnitt 4.1, zum anderen der mittlere Abstand  $d_2$  von Ebenenpunkten zur jeweils homologen Ebene des anderen Datensatzes. Diese Werte sind ebenfalls aufgeführt. Abb. 8 zeigt schließlich exemplarisch den Vergleich aller Datensätze vor bzw. nach der Koregistrierung anhand eines Querschnitts durch ein Gebäudedach.

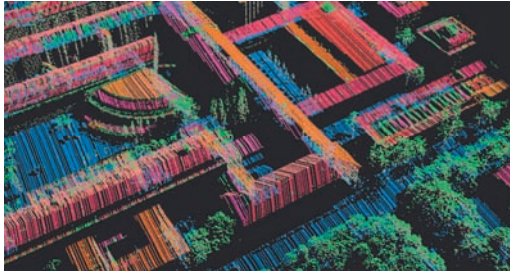
## 5 Abschließende Bemerkungen

Die hier vorgestellte Koregistrierung mehrerer Laser-Punktwolken beruht auf einer Zuordnung von zuvor aus den Einzelpunkten abgeleiteten ebenen Strukturen, die bei Daten von städtischem Gebiet häufig zu finden sind. Im Vergleich zum ICP-Verfahren wird keine Iterationsschleife benötigt, da die exakte Zuordnung homologer Ebenen in den bereits approximativ georeferenzierten Daten möglich ist. Der Zeitbedarf für den Vorgang der Koregistrierung ist daher nahezu vernachlässigbar, der Großteil der Rechenzeit wird auf die vorgeschalteten Filter- und Segmentationsverfahren verwendet. Eine Vorklassifizierung der Punkte ist aber ohnehin in vielen Fällen für die anschließende Verarbeitung erforderlich.

In zahlreichen Tests stellte sich heraus, dass die erste Methode merklich von den Parametereinstellungen in den Formeln (5) und (6) abhängt. Bei den Schnittpunkten zeigte sich also nicht die zunächst erwartete Stabilität. Insbesondere dann, wenn die sich schneidenden Ebenen hunderte Meter auseinander liegen oder sich unter einem flachen Winkel schneiden, schwanken auch die Schnittpunkte um mehrere Meter (abhängig von der Ebenen-anpassung). Mit der zweiten Methode wurden deutlich bessere Ergebnisse erzielt. Hier konnte eine durchschnittliche Angleichung der Ebenenpunkte nach der Koregistrierung bis auf ca. 20 cm an die jeweils homologe Ebene des anderen Datensatzes erreicht werden. Die verbleibenden Abstände sind auf Restfehler bei der Sensorkalibrierung zurückzuführen, der Wert liegt aber auch im Bereich der hardwareseitigen Entfernungsauflösung des Laserscanners. Zukünftige Arbeiten werden sich mit der Detektion von Objektänderungen in Datensätzen beschäftigen, die mit bestimmten Zeitabständen aufgenommen wurden.



(a) Datensatz 1  
Referenzdatensatz

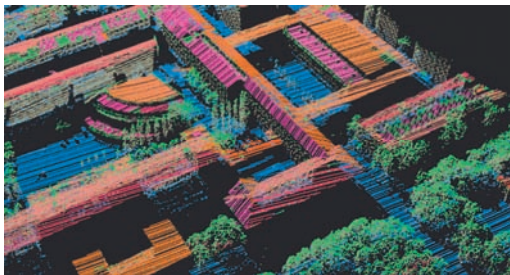


(b) Datensatz 2

Methode 1  
Drehwinkel [°] (-0.0772, 0.1831, 0.0957)  
Translation [m] (-1.7640, -1.4650, -0.9395)

Methode 2  
Drehwinkel [°] (-0.0040, -0.0441, 0.0790)  
Translation [m] (-1.5128, -1.4491, -1.0440)

	vorher	Methode1	Methode2
d1 =	2.5231 m	0.7728 m	0.7818 m
d2 =	0.9795 m	0.3792 m	0.1123 m

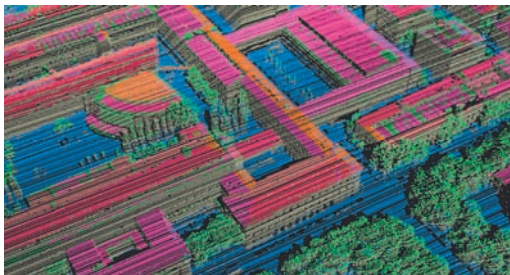


(c) Datensatz 3

Methode 1  
Drehwinkel [°] (-0.3759, -0.1294, 0.2255)  
Translation [m] (1.2782, -3.7817, 0.4491)

Methode 2  
Drehwinkel [°] (-0.1355, -0.0944, 0.2022)  
Translation [m] (1.201, -3.0897, 0.4006)

	vorher	Methode1	Methode2
d1 =	4.5251 m	1.3812 m	1.5406 m
d2 =	1.6615 m	0.3928 m	0.2479 m



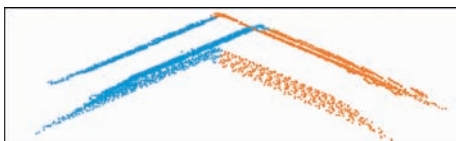
(d) Datensatz 4

Methode 1  
Drehwinkel [°] (0.0687, -0.1901, -0.0673)  
Translation [m] (0.8346, 3.4220, -0.0641)

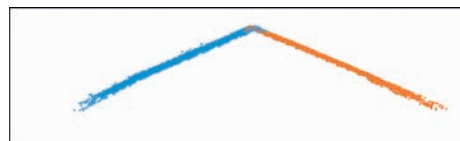
Methode 2  
Drehwinkel [°] (0.0696, -0.0001, -0.0448)  
Translation [m] (0.4133, 2.6527, -0.1068)

	vorher	Methode1	Methode2
d1 =	3.6649 m	0.7061 m	1.0897 m
d2 =	1.1316 m	0.3688 m	0.1702 m

Abb. 7: Koregistrierung von vier verschiedenen Ansichten des gleichen urbanen Gebiets.



(a)



(b)

Abb. 8: Blick längs eines Gebäudedachs, (a) vor der Koregistrierung, (b) nach der Koregistrierung.

## Literatur

- ARUN, K.S., HUANG, T.S. & BLOSTEIN, S.D., 1987: Least square fitting of two 3-d point sets. – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence **9** (5): 698–700.
- BESL, P.J. & MCKAY, N.D., 1992: A method for registration of 3-D shapes. – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence **14** (2): 239–256.
- BURMAN, H., 2000: Calibration and Orientation of Airborne Image and Laser Scanner Data Using GPS and INS. – Dissertation, Royal Institute of Technology, Stockholm, Schweden. ISBN 91-7170-565-1.
- DOLD, C. & BRENNER, C., 2006: Registration of terrestrial laser scanning data using planar patches and image data. – The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **36** (5): 78–83.
- FILIN, S., 2003: Recovery of Systematic Biases in Laser Altimetry Data Using Natural Surfaces. – Photogrammetric Engineering & Remote Sensing **69** (11): 1235–1242.
- FISCHLER, M. & BOLLES, R., 1981: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. – Communications of the ACM **24** (6): 381–395.
- GEIBEL, R. & STILLA, U., 2000: Segmentation of laser-altimeter data for building reconstruction: Comparison of different procedures. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing **33** (B3): 326–334.
- HEBEL, M. & STILLA, U., 2007: Automatic registration of laser point clouds of urban areas. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **36** (3/W49A): 13–18.
- HOOVER, A., JEAN-BAPTISTE, G., JIANG, X., FLYNN, P.J., BUNKE, H., GOLDOF, D.B., BOWYER, K., EGERT, D.W., FITZGIBBON, A. & FISHER, R.B., 1996: An Experimental Comparison of Range Image Segmentation Algorithms. – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence **18** (7): 673–689.
- HOUSEHOLDER, A.S., 1958: Unitary Triangularization of a Nonsymmetric Matrix. – Journal of the ACM **5** (4): 339–342.
- JUTZI, B. & STILLA, U., 2006: Range determination with waveform recording laser systems using a Wiener Filter. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **61** (2): 95–107.
- KAGER, H., 2004: Discrepancies Between Overlapping Laser Scanner Strips – Simultaneous Fitting of Aerial Laser Scanner Strips. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **35** (B/1): 555–560.
- MAAS, H.-G., 2000: Least-Squares Matching with Airborne Laserscanning Data in a TIN Structure. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing **33** (3A): 548–555.
- RABBANI, T., DIJKMANN, S., VAN DEN HEUVEL, F. & VOSSELMAN, G., 2007: An integrated approach for modelling and global registration of point clouds. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **61** (6): 355–370.
- REITBERGER, J., KRZYSZEK, P. & STILLA, U., 2008A: Analysis of full waveform LIDAR data for the classification of deciduous and coniferous trees. – International Journal of Remote Sensing **29** (5): 1407–1431.
- REITBERGER J., SCHNOERR C., KRZYSZEK P. & STILLA, U. 2008B: Towards 3D mapping of forests: A comparative study with first/last pulse and full waveform LiDAR data. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **37** (B8): 1397–1404.
- RESSL, C., KAGER, H. & MANDLBURGER, G., 2008: Quality checking of ALS Projects Using Statistics of Strip Differences. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **37** (3B): 253–260.
- RUTZINGER, M., HÖFLE, B., HOLLAU, M. & PFEIFER, N., 2008: Object-Based Point Cloud Analysis of Full-Waveform Airborne Laser Scanning Data for Urban Vegetation Classification. – Sensors **8** (8): 4505–4528.
- SCHNABEL, R., WAHL, R. & KLEIN, R., 2006: Shape Detection in Point Clouds, – *Technical Report CG-2006-2*, Universität Bonn.
- SITHOLE, G. & VOSSELMAN, G., 2004: Experimental comparison of filter algorithms for bare-earth extraction from airborne laser scanning point clouds. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **59** (1–2): 85–101.
- SKALLOUD, J. & LICHTI, D., 2006: Rigorous approach to bore-sight self-calibration in airborne laser scanning. – ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing **61** (1): 47–59.
- SKALLOUD, J. & SCHAEER, P., 2007: Towards Automated LiDAR Bore-sight Self-calibration. – 5th Symposium on Mobile Mapping Technology, Padua, Italien.
- STILLA, U. & JUTZI, B., 2009: Waveform Analysis for Small-Footprint Pulsed Laser Systems. – Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing. Boca Raton, FL: Taylor & Francis: 215–234.
- VOSSELMAN, G., 2008: Analysis of planimetric accuracy of airborne laser scanning surveys. – International Archives of Photogrammetry, Re-

- Remote Sensing and Spatial Information Sciences **37** (3A): 99–104.
- VOSSELMAN, G., GORTE, B.G.H., SITHOLE, G. & RAB-BANI, T., 2004: Recognising structure in laser scanner point clouds. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **36** (8): 33–38.
- WEHR, A. & LOHR, U., 1999: Airborne Laser Scanning - an Introduction and Overview. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **54**: 68–82.

## Adressen der Autoren:

Dipl.-Math. techn. MARCUS HEBEL, FGAN-FOM Forschungsinstitut für Optronik und Mustererkennung, Gutleuthausstr. 1, D-76275 Ettlingen, Tel.: +49-7243-992-323, Fax: +49-7243-992-299, e-mail: hebel@fom.fgan.de

Prof. Dr.-Ing. UWE STILLA, Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München, Arcisstr. 21, D-80333 München, Tel.: +49-89-289-22671, Fax: +49-89-2809573, e-mail: stilla@tum.de

Manuskript eingereicht: September 2008  
Angenommen März 2009





# Using Airborne Laser Scanner Data and CIR Orthophotos to Estimate the Stem Volume of Forest Stands

CHRISTOPH STRAUB, MATTHIAS DEES, HOLGER WEINACKER, BARBARA KOCH, Freiburg

**Keywords:** Airborne Laser Scanning, orthophotos, forestry, stem volume, yield tables

**Summary:** Accurate assessment of timber resources is of great importance for forest management. This article evaluates a combination of airborne laser scanning and color infrared (CIR) orthophotos to estimate the stem volume of forest stands using growth and yield tables recommended for the Federal State of Baden-Württemberg, Germany. The stand height, which was estimated based on a canopy height model (computed from the laser scanner data), was used as the input variable into a volume function, which was derived from the yield tables. In order to improve the volume estimation, coniferous and deciduous trees were classified automatically using optical data. Different parameters for coniferous and deciduous trees were derived from the yield tables for stem volume estimation. Finally, the derived timber volume was “corrected” using the canopy cover as an estimate for the “degree of stocking”. The method was verified in a forest area in Southern Germany with 300 circular inventory plots each with a radius of 12 m. The relation between estimated timber volume and the volume calculated from the inventory data reached a correlation coefficient of  $r=0.73$  (RMSE=31%). The plot values were averaged within forest stands with the same age class and a correlation of  $r=0.83$  (RMSE=17%) was achieved. The results show that the method can provide valuable information for stand-wise forest inventories over large areas.

**Zusammenfassung:** Verwendung von flugzeuggetragenen Laserscannerdaten und CIR Orthobildern zur Schätzung des Stammholzvolumens von Waldbeständen. Die präzise Abschätzung von Holzressourcen ist von großer Bedeutung für die Waldbewirtschaftung. Dieser Artikel evaluiert eine kombinierte Auswertung von flugzeuggetragenen Laserscannerdaten und Farb-Infrarot (CIR) Orthobildern zur Abschätzung des Stammholzvolumens von Waldbeständen unter Verwendung von empfohlenen Ertragstabellen für Baden-Württemberg. Die Höhe von Waldbeständen, welche basierend auf einem Vegetationshöhenmodell aus Laserscannerdaten geschätzt wurde, diente als Eingangsvariable in eine aus den Ertragstabellen abgeleitete Volumenfunktion. Zur Verbesserung der Volumenschätzung wurden Nadel- und Laubbäume unter Verwendung von optischen Daten automatisch klassifiziert. Unterschiedliche Parameter für Laub- und Nadelholz wurden zur Schätzung des Stammholzvolumens von Waldbeständen aus den Ertragstabellen abgeleitet. Abschließend wurde das abgeleitete Holzvolumen „korrigiert“ über den Überschirmungsgrad als Schätzgröße für den Bestockungsgrad. Eine Verifizierung der Methode erfolgte in einer Waldfläche in Süddeutschland mit 300 kreisförmigen Inventurpunkten der Forstverwaltung (Radius: 12 m). Der Zusammenhang zwischen geschätztem Holzvolumen und dem Volumen aus den Inventurdaten zeigte eine Korrelation von  $r=0.73$  (RMSE=31%). Nachdem die Werte innerhalb von Waldbeständen mit der gleichen Altersklasse gemittelt wurden, konnte eine Korrelation von  $r=0.83$  (RMSE=17%) erreicht werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Methode wertvolle flächige Informationen für einzelbestandsweise Forstinventuren liefern kann.

---

## 1 Introduction

Forest management and planning requires reliable information regarding the forest status and forest production potential. For this rea-

son, forest inventories with extensive field measurements and observations are carried out. In the state forests of the Federal State of Baden-Württemberg in Germany, which are larger than 1500 ha, permanent sample plots

are usually used to estimate dendrometrical parameters. In smaller forest properties, as well as in private forests, often no sample plot inventories are implemented and other techniques are required to assess forest characteristics. In this study, measurements from Airborne Laser Scanning (ALS) and optical data were evaluated for stem volume estimation (as one of the most important quantitative parameters to characterize a forest stand) using existing forest growth and yield tables.

ALS is an active remote sensing technique which allows accurate height measurements of the earth's surface, vegetation cover or other natural and man-made objects. Due to the fact that the laser penetrates through gaps in the canopy, which allows measuring the canopy height as well as the elevation of the terrain underneath, it is of great interest for forest mapping and monitoring. Most ALS systems use short laser pulses to determine the range to an object by measuring the time of flight between transmission of a pulse and detection of the reflected signal. In addition to the range measurements the scan angle is required. The absolute position and orientation of the sensor is determined using a Global Positioning System (GPS) receiver and an Inertial Measurement Unit (IMU) to calculate the 3D coordinates of the reflected signals in a local coordinate system (KRAUS 2004). The result is an irregular point cloud. The point density depends on flight and system parameters. Besides conventional ALS systems, which record the first and last echo for each emitted laser beam, full-waveform scanners, which record the whole echo waveform, have become more important for applications in forestry (MALLET & BRETAR 2009, REITBERGER et al. 2008). A digital terrain model DTM (which represents the bare earth) and a digital surface model DSM (consisting of the earth and any other objects like vegetation, buildings, etc.) can be derived from the point cloud. Many different filtering algorithms have been developed during the past years for terrain modelling (SITHOLE 2005). Various studies have already proven the potential of ALS for accurate estimation of forest inventory parameters such as stand heights, basal area, and timber volume (HYYPÄ et al. 2006, KOCH et al. 2006, NÆSSET 2002). Regression analyses have been used in many studies

concerning forest parameter estimation to identify the relationship between laser-derived variables (representing canopy height and density) and ground-truth data from field plots to calibrate models. The models are used in a second step to estimate inventory parameters, e. g., timber volume for the entire study area (HOLLAUS et al. 2007, NÆSSET 2002, MEANS et al. 2000).

The idea of this study was to develop and verify a method to estimate the stem volume of forest stands based on information from ALS and optical data in combination with existing yield tables. A "stand" is a relatively homogeneous formation of a forest (e. g., uniform in species composition or age) and is managed as a single unit. Thus, information on a stand level is of high importance for forest management. Yield tables were developed in the past from extensive field measurements and give information about structural forest parameters like timber volume attainable under certain conditions. First ideas of the method are described in (STRAUB et al. 2008a) and (DEES et al. 2006). After a characterization of the study area, and the remote sensing data, and the reference data a description of the methodology is given. The method is designed to be of use for practical forestry applications. Results are presented and, finally, the potential to provide information for forest inventories is discussed.

## 2 Study Area

The method was verified in a forest area with a size of 9.24 km<sup>2</sup> in Southern Germany, lo-

**Tab. 1:** Tree species composition of the study site (source: forest management plan).

Tree Species	Proportion
Scotch pine ( <i>Pinus sylvestris</i> )	51 %
Oak ( <i>Quercus petraea</i> )	14 %
Beech ( <i>Fagus sylvatica</i> )	10 %
Red oak ( <i>Quercus rubra</i> )	10 %
Douglas fir ( <i>Pseudotsuga menziesii</i> )	5 %
Hornbeam ( <i>Carpinus betulus</i> )	4 %
Other species	6 %

cated north of the city of Karlsruhe (coordinates of the upper left corner in Gauss Krüger: 3456300 (easting) / 5436100 (northing)). The tree species composition (derived from the forest management plan) is listed in Tab. 1. The proportions per species were estimated in the field, based on the area covered by the crowns of each individual species in a stand.

### 3 Remote Sensing Data

Full-waveform laser scanner data were acquired in August 2007 by TopoSys GmbH using the “Harrier 56” LIDAR system mounted on a helicopter. The scanner used in this system is the Riegl LMS-Q560. To achieve a high point density, the study area was flown twice and a large side lap of more than 50% was used. Important flight and system parameters are listed in Tab. 2.

The software “RiANALYZE 560” was used by the data provider to process the full-waveform data. The data was delivered in ASCII format with 3D coordinates of the reflections and additional information such as the echo signal intensity and the echo pulse width.

Both a terrain and a surface model with 1m resolution were derived from the point cloud. An “Active Surface Algorithm”, implemented in the software “TreesVis”, was used for filtering and interpolation. Details about the filtering technique can be found in (ELMQVIST et al. 2001) and (WEINACKER et al. 2004). A normalized digital surface model (nDSM), often referred to as canopy height model (CHM) in

**Tab. 2:** Flight and system parameters of the flight campaign in summer 2007 with the “Harrier 56” (AGL = above ground level).

Parameter	Value
Measurement rate	100 [kHz]
Field of view	45 [°]
Flying height	450 [m] AGL
Flying speed	30 [m/s]
Point density	16 [points/m <sup>2</sup> ]
Vertical / horizontal accuracy	< 0.20 [m] / < 0.50 [m]

**Tab. 3:** Flight and technical parameters of the RGB/NIR line scanner of the flight campaign in summer 2008 with the “Falcon II system” (AGL = above ground level).

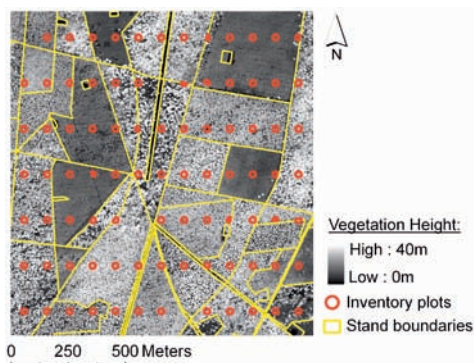
Parameter	Value
Flying height	700 [m]
Spectral Channels	Blue: 450–490 [nm] Green: 500–580 [nm] Red: 580–660 [nm] Near infrared: 770–890 [nm]
Viewing angle	21.6 [°]
Line Rate	Up to 330 [Hz]
Pixel per line	682
Ground sampling distance	0.4 [m]

forests, was derived by subtracting the DTM from the DSM.

Additionally, optical data in four spectral channels were recorded in July 2008 by TopoSys GmbH with the aid of an RGB/NIR line scanner (integrated in the Falcon II system). The individual flight strips were rectified and georeferenced with the aid of a DSM, which was filtered from laserscanner data (6–7 points/m<sup>2</sup>) acquired at the same time with the optical data. Important flight and technical parameters of the RGB/NIR line scanner are listed in Tab. 3. Orthophotos were computed by the data provider TopoSys using the software “TopPIT” and were delivered with 25 cm resolution.

### 4 Reference Data

Forest inventory data (circular sample plots) from summer 2006 were provided by the state forest administration of the Federal State of Baden-Württemberg. These permanent georeferenced sample plots were distributed over the study area on the intersections of a regular 100×200 m raster. In each of the plots trees were measured in the field within concentric circles using the following radii: 2 m, 3 m, 6 m and 12 m. Within each concentric circle, trees with a diameter at breast height (DBH) greater than 7 cm (2 m radius), 10 cm (3 m radius), 15 cm (6 m radius) and 30 cm (12 m radius)



**Fig. 1:** Canopy height model with stand boundaries and position of inventory plots.

were measured. Two top heights of the main crop and one top height of the dominated crop were measured using a Vertex® instrument. The arithmetic mean of the height measurements was calculated as an average top height for each plot. Stand height curves with the DBH as input variable were used to estimate the heights of the remaining trees (KORN-ALLAN et al. 2004). Based on these measurements, the stem volume of single trees was computed using volume functions and the total timber volume in solid cubic meter per hectare (defined as the sum of all stems and branches with a diameter above 7 cm) was derived for each plot. Moreover, a digital stand map was provided by the forest administration. A total number of 108 stands are located completely within the study site. Fig. 1 shows a part of the study area with the CHM, stand boundaries and inventory plots.

## 5 Methodology

Yield tables, recommended for the Federal State of Baden-Württemberg (MLR 1993), were used to estimate the stem volume of forest stands in conjunction with variables derived from ALS and CIR orthophotos. The tables are grouped into 16 different tree species and describe the development and growth of forest stands based on a specific forestry concept (treatment of a stand like moderate or strong thinning). For each species, several yield classes are defined which describe the

influence of environmental conditions (climate, topography and soil) and thus the production or growth potential of sites. The tables provide numerical forestry parameters related to the area unit of one hectare such as tree number, top height, basal area, mean diameter or volume as a function of the age. Due to the fact that ALS data provides very precise height measurements, the yield tables were used to estimate timber volume as a function of the stand height. The following variables have to be determined for the application of yield tables:

1. Tree species composition of a stand: Necessary for the selection of a suitable table. CIR orthophotos were used to identify and classify coniferous and deciduous trees. For both classes a separate volume function was derived from the tables.
2. Yield class: Describes the production or growth potential and is usually necessary for the selection of a suitable table. As described in (METTE 2007) information on the site condition is very important if stem biomass is estimated by the age of a stand. If stem biomass is estimated by the forest height the site condition has a rather small influence. This statistical relation between (mid) height and (stem) volume of a stand is known as the “law of Eichhorn” (PRETZSCH 2001). Thus, the yield class was not further considered in this study.
3. Stand height: The stand height is estimated from ALS data and is used as input variable into a height based volume function derived from the yield tables.
4. “Degree of stocking”: The timber volume derived from a yield table is multiplied by the degree of stocking DS (reduction factor), defined by the quotient of actual basal area  $BA_{real}$  to the corresponding basal area of a suitable yield table  $BA_{table}$  for moderate thinning (KRAMER & AKÇA 1995):

$$DS = BA_{real} / BA_{table} \quad (1)$$

The result is an estimate of the actual volume of a stand. According to (HUSS 1984) the canopy cover, also referred to as canopy density, is appropriate to estimate the degree of stocking with remote sensing data.



### 5.1 Estimation of Forest Stand Height Using ALS Data

The top height  $H$  of forest stands is defined as the height of the hundred trees with largest diameter per hectare (BURSCHEL & HUSS 1997). Since trees with the largest diameter are usually the highest trees, the top height represents the height of trees in the uppermost layer which can be modelled with ALS data. Due to the shorter time difference to the forest inventory in summer 2006, the full-waveform laser scanner data (acquired in August 2007) was used for top height estimation. Several variables related to vegetation height were derived from the point cloud (after subtracting the ground surface height), as well as the nDSM, and were analyzed in order to determine the best estimate for the top height. Similar to earlier findings (NÆSSET 2002, MEANS et al. 2000, RIEGER et al. 1999) several height percentiles were calculated for each inventory plot based on the nDSM  $nDSMhp_{60}$ ,  $nDSMhp_{70}$ ,  $nDSMhp_{80}$ ,  $nDSMhp_{90}$ ,  $nDSMhp_{max}$  and based on the point cloud. Percentiles were computed using all laser points  $ahp_{60}$ ,  $ahp_{70}$ ,  $ahp_{80}$ ,  $ahp_{90}$ ,  $ahp_{max}$  and for the first echo points (=first reflections detected in the waveforms by the RiANALYZE 560 software)  $fhp_{60}$ ,  $fhp_{70}$ ,  $fhp_{80}$ ,  $fhp_{90}$ ,  $fhp_{max}$ . The results are shown in Tab. 4.

The 90th percentile of the nDSM ( $nDSMhp_{90}$ ) showed the highest correlation with the field data and was used as an estimate for the top height.

### 5.2 Estimation of the Canopy Cover from ALS Data

Canopy cover  $CC$  was defined in this study as the ground covered by a vertical projection of tree crowns in the uppermost layer. For each sample plot, the canopy cover was estimated based on the nDSM, which represents the canopy heights for each xy position. A threshold operation (selection of pixels with height values within a defined interval) was used to extract potential crown regions. The threshold operation is defined as

$$CR = \{(xy) \in R \mid \Delta h_{min} \leq nDSM_{xy} \leq \Delta h_{max}\} \quad (2)$$

where  $CR$  = Output region (crown regions)

$R$  = Region of Interest (ROI)

$nDSM_{xy}$  = Height values [m] of the nDSM for each xy position

$\Delta h_{min}$  = Minimum height threshold [m]

$\Delta h_{max}$  = Maximum height threshold [m]

The minimum height threshold  $\Delta h_{min}$  for each plot was calculated relative to the estimated top height  $H$ , assuming that height values above 50% of the top height belong to the uppermost layer ( $\Delta h_{min} = H \cdot 0.5$ ) whereas  $\Delta h_{max}$  was set to the maximum height value within the sample plots. The ratio of the size of extracted crown regions  $CR$  to the plot size was used as an estimate for the canopy cover.

**Tab. 4:** Correlations of height percentiles from raw data and nDSM with field measurements (inventory plots) to estimate the top height of forest stands.

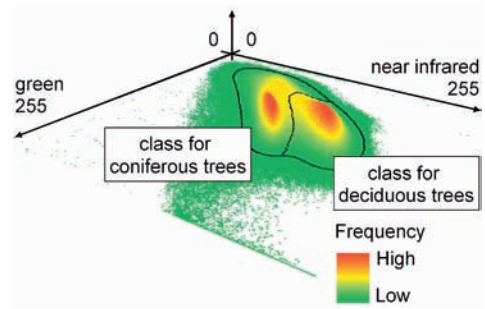
height percentiles nDSM	Correlation coefficient (r)	height percentiles – raw data (all laser points)	Correlation coefficient (r)	height percentiles – raw data (only first echo points)	Correlation coefficient (r)
$nDSMhp_{max}$	.835(**)	$ahp_{max}$	.839(**)	$fhp_{max}$	.839(**)
$nDSMhp_{90}$	.868(**)	$ahp_{90}$	.844(**)	$fhp_{90}$	.853(**)
$nDSMhp_{80}$	.837(**)	$ahp_{80}$	.778(**)	$fhp_{80}$	.813(**)
$nDSMhp_{70}$	.800(**)	$ahp_{70}$	.619(**)	$fhp_{70}$	.741(**)
$nDSMhp_{60}$	.735(**)	$ahp_{60}$	.441(**)	$fhp_{60}$	.580(**)

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

### 5.3 Automatic Classification of Coniferous and Deciduous Trees Using CIR Orthophotos

A widely acknowledged phenomenon is the generally observed lower spectral reflectance of coniferous stands when compared to deciduous stands especially for the near infrared wavelengths (RAUTIAINEN 2005, HILDEBRANDT 1996, HUSS 1984). CIR orthophotos were used to classify coniferous and deciduous trees. First, a vegetation mask was generated solely using the laser data. The segmentation of vegetation and non-vegetation areas is based on the assumption that many laser reflections will be found inside of the vegetation from different vegetation layers between the top of the canopy and the bare earth. Those points are referred to as “intermediate points”. No “intermediate points” will be found within artificial non-ground objects like buildings because of the impenetrable surfaces. “Intermediate points” can be used for classification if multiple echoes (extracted from full-waveform data) are available. Further details regarding the segmentation method can be found in (STRAUB et al. 2008b).

Within the vegetation mask, coniferous and deciduous trees were classified with the help of a “two-dimensional feature space image” as shown in Fig. 2. The value at one point  $P(g_1, g_2)$  indicates the frequency of the gray value combination  $(g_1, g_2)$  with  $g_1$  indicating the values of the green channel as row index and those values  $g_2$  of the near infrared channel as column index. The two expected classes (for coniferous and deciduous trees) are clearly visible. A segmentation of the feature space image was achieved using a pouring algorithm which regards the input image as a topological surface and interprets the gray values as heights. First, local maxima are extracted which have larger values than their direct neighbors. The maxima are the starting points for an expansion (region growing) until “valley bottoms” are reached (like water running downhill from the maxima in all directions). In order to segment the input image into exactly two classes (representing coniferous and deciduous trees) the feature space image was iteratively smoothed with a moving average filter. For each iteration the filter size was en-

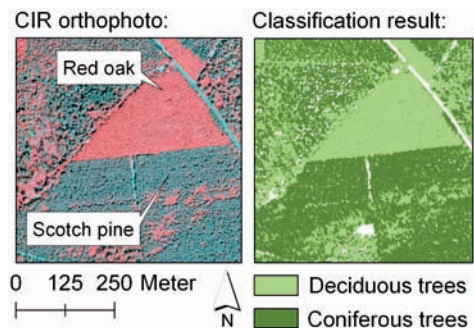


**Fig. 2:** 3D view of the two-dimensional feature space image showing the frequency of the gray value combination of near infrared and green channel with segmented classes for coniferous and deciduous trees.

larged until exactly two segments were delineated (boundaries of the segmented regions are visualized in Fig. 2).

Each point  $P$  of the study area with  $g_1$  and  $g_2$  as the respective gray values of green and near infrared channel ( $g_1$  interpreted as row coordinate and  $g_2$  as column coordinate) is classified according to its position in the feature space. If  $P$  is an element of the coniferous or deciduous class (as shown in Fig. 2) it is classified respectively. A result of the classification is shown in Fig. 3.

The classification accuracy was evaluated using the inventory plots. The comparison of the coniferous proportion classified by the automated method (within the reference plots) with the coniferous proportion of the field data yields a correlation of  $r = 0.87$ .



**Fig. 3:** CIR orthophoto and result of the classification into deciduous and coniferous trees.

### 5.4 Retrieval of a Height Based Volume Function from Existing Yield Tables

A polynomial of second order was used to estimate timber volume per hectare as a function of the forest stand height:

$$V = a + bH + cH^2 \tag{3}$$

where  $V$  = Timber volume [m<sup>3</sup>/ha]  
 $H$  = Top height [m]  
 $a, b, c$  = Individual parameters (depending on tree species composition)

Different parameters  $a, b, c$  were derived for coniferous as well as for deciduous trees from existing growth and yield tables as recommended for the Federal State of Baden-Württemberg, Southern Germany (MLR 1993). Scotch pine (*Pinus sylvestris*) is the major coniferous species within the study site (see Tab. 1). For this reason, it was used as a “reference species” for coniferous trees. As described in Section 5 several yield classes are defined for each species. For scotch pine, 7 different classes are defined and the corresponding height based volume function was derived as a regression through all of these classes. The most important deciduous tree species within the study site is oak (*Quercus petraea*), which was defined as “reference species” for deciduous trees. Analogous to the approach for coniferous trees, the corresponding volume function for deciduous trees was derived as a regression through all yield classes for oak (7 classes in total). Results of the regression analysis are summarized in Tab. 5.

### 5.5 Stem Volume Estimation

For each sample plot the timber volume was estimated in solid cubic meter per hectare. The estimation of timber volume as a function of top height, tree species composition and degree of stocking can be written as:

$$V = CC \cdot \left[ \left( (a_c + b_c H + c_c H^2) \cdot \frac{P_c}{100} \right) + \left( (a_d + b_d H + c_d H^2) \cdot \frac{P_d}{100} \right) \right] \tag{4}$$

where  $V$  = Estimated stem volume in [m<sup>3</sup>/ha]  
 $H$  = Top height [m] (estimated from nDSM)  
 $a_c, b_c, c_c, a_d, b_d, c_d$  = Parameters for coniferous (c) and for deciduous (d) trees  
 $P_c, P_d$  = Percentage of coniferous (c) and for deciduous (d) trees (automatically classified with optical data)  
 $CC$  = Canopy cover derived from the nDSM as an estimate for the “degree of stocking”

## 6 Results

Forest inventory plots (as described in Section 4) were used for verification. The estimated timber volume and the volume derived from the inventory data were compared for all sample plots (n = 300) as well as for averaged values, which were computed from plots located within forest stands having the same age class. The age class was taken from the forest management plan. For accuracy assessment, the

**Tab. 5:** Parameters derived from yield tables (MLR 1993) by regression analysis to derive timber volume in [m<sup>3</sup>/ha] as a function of the stand height.

Class	Number of yield classes	a [m <sup>3</sup> /ha]	b [m <sup>3</sup> /ha]	c [m/ha]	R <sup>2</sup> (coefficient of determination)	Range	
						Min. Height [m]	Max. Height [m]
Coniferous trees	7	-90.2971	18.0819	-0.0022	0.98	8.3	37.5
Deciduous trees	7	-145.3082	16.4528	0.0684	0.99	7.8	40

absolute and relative root mean square errors (RMSE) were calculated. The absolute RMSE is defined as:

$$\text{RMSE [m}^3/\text{ha]} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}, \quad (5)$$

where  $y_i$  = the observed volume for plot  $i$  [m<sup>3</sup>/ha]  
 $\hat{y}_i$  = the predicted volume for plot  $i$  [m<sup>3</sup>/ha]  
 $n$  = the number of sample plots used for validation

The relative RMSE is defined as the RMSE normalized to the mean  $y_{\text{mean}}$  of the observed values:

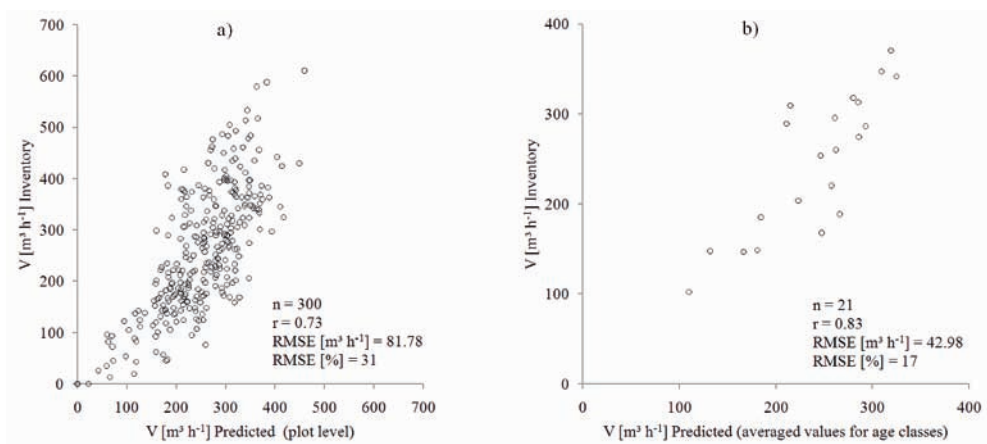
$$\text{RMSE [\%]} = \frac{\text{RMSE}}{y_{\text{mean}}} \cdot 100 \quad (6)$$

A correlation coefficient of  $r=0.73$  and  $\text{RMSE} = 31\%$  was reached when using all sample plots (a scatter plot is shown in Fig. 4a). The comparison of averaged values (for stands with the same age class) is shown in Fig. 4b. Only stands with a minimum of three plots were selected ( $n=21$ ) and a correlation of  $r=0.83$  and  $\text{RMSE} = 17\%$  was achieved.

## 7 Discussion

A method was presented which combines ALS data and further information from optical data to assess the stem volume of forest stands. Due to the fact that existing growth and yield tables were used for volume estimation, the method can provide valuable information for forests without sample plot inventories. Forest inventory data (circular sample plots), which were acquired within the study area by the state forest administration in summer 2006, were solely used for verification of the developed method. Different variables (vegetation characteristics) were extracted from ALS data and CIR orthophotos. It was shown that ALS data provides very precise height measurements to estimate the top height of forest stands, which was used as input variable into a height based volume function derived from the yield tables. Using only one variable (the 90th percentile of the nDSM) a high correlation of  $r=0.87$  was reached for height estimation on plot level. To improve the volume estimation, coniferous and deciduous trees were classified fully automatically using optical data. The comparison of the coniferous proportion classified by the automated method with the coniferous proportion of the field data yields a high correlation of  $r=0.87$ .

In order to derive different parameter sets from the yield tables it was necessary to define



**Fig. 4:** Verification of the stem volume estimation a) using all inventory plots, b) estimation with averaged values for age classes.

a “reference species” for coniferous and deciduous trees. For the definition of a “reference species” it is helpful if information about the dominant tree species within the study site is available. In this study the species composition was derived from the forest management plan. As an alternative approach visual interpretation of optical data is suggested. As a further variable, the canopy cover (tree crown cover) was derived based on the nDSM by extracting all pixels above a threshold relative to the top height. The canopy cover was used as an estimate for the degree of stocking. The multiplication of the degree of stocking with the volume obtained from a yield table affords an estimate for the actual volume.

A correlation of  $r=0.73$  (RMSE = 31%) was reached for stem volume estimation when regarding all sample plots. The relatively high scatter on plot level can be explained to some extent by positional errors of the reference data (the plot locations) and local variations of the forest structure, which have a high influence if timber volume is estimated for small regions like the 452 m<sup>2</sup> sample plots used in this study. The position accuracy of the centre point of inventory plots was quantified in a recent study with an average deviation of 3.77 m compared to very accurate measurements using a theodolite (BREIDENBACH 2008). However, the variation was compensated when plot values were averaged for larger units (here: for stands with the same age class) and a very satisfying accuracy of  $r=0.83$  (RMSE = 17%) was reached.

The results show that information from ALS and CIR orthophotos can be used in conjunction with existing yield tables to estimate the stem volume of forests. Thus, the method can provide valuable information for standwise inventories, which is particularly interesting for forests without sample plot inventories. Many studies require reference data to identify relationships between laser-derived variables and ground-truth data from field plots to calibrate models. The advantage of forest attribute estimation based on yield tables is that such reference data is not mandatory.

The observed error (RMSE = 31%) of this study is in the range of those reported by (BREIDENBACH et al. 2008) (RMSE: 22.5% to 31.3%), who used mixed-effects models in

combination with forest inventory plots (see Section 4) as ground truth data, to estimate stem volume for two different study sites located within the Federal State of Baden-Württemberg. In a study from (PACKALÉN & MALTA-MO 2006) ALS data and aerial photographs were used in a boreal forest in Finland to predict the plot volume using the  $k$ -MSN method. They report a RMSE of 24% for estimates of total volume.

The current method does not utilize the full potential of full-waveform ALS data, but rather uses these data in the same way as conventional ranging systems. The advantage is that the method can be used with any type of ALS data, e.g., first/last echo data plus CIR orthophotos. However, further research will concentrate on the integration of additional information available from full-waveform ALS data, such as the echo signal intensity of each reflection. A study from (REITBERGER et al. 2008) has recently shown that these additional parameters can be used for classification of coniferous and deciduous trees.

In order to improve the volume estimation for uneven-aged stands (that have a more complex forest structure) further studies will concentrate on the extraction of additional forest characteristics from the full waveform data, e.g., the vertical stand structure (different layers) or horizontal variability. In this study it was possible to delineate coniferous and deciduous trees using a fully automated approach, whereas the classification of species such as Scotch pine (*Pinus sylvestris*), Oak (*Quercus petraea*), or Beech (*Fagus sylvatica*) will need further research. Thus, automatic and/or semi-automatic classification procedures will be developed to extract additional information on tree species composition.

## Acknowledgements

The authors would like to express their gratitude to Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) which provided funding for the project within the doctoral scholarship programme. Furthermore, we would like to thank the Forest Research Institute of Baden-Württemberg (FVA), in particular Arne Nothdurft, for providing the reference data for this study.



## References

- BURSCHEL, P. & HUSS, J., 1997: Grundriß des Waldbaus. – Parey, Berlin.
- BREIDENBACH, J., 2008: Regionalisierung von Waldinventuren mittels aktiver Fernerkundungstechniken. – Doctoral Thesis, Freiburg.
- BREIDENBACH, J., KUBLIN, E., MCGAUGHEY, R.J., ANDERSEN, H.E. & REUTEBUCH, S.E., 2008: Mixed-effects models for estimating stand volume by means of small footprint airborne laser scanner data. – *Photogrammetric Journal of Finland* **21** (1): 4–15.
- DEES, M., STRAUB, C., WANG, Y., KOCH, B. & WEINACKER, H., 2006: Auswertung von zwei Laser-scanner-Testdatensätzen: Waldkarten und Kenngrößen des Waldes. – Internal report of a demonstration project for E.ON-Ruhrgas, Essen.
- ELMQVIST, M., JUNGERT, E., LANTZ, F., PERSSON, Å. & SÖDERMAN, U., 2001: Terrain Modelling and Analysis Using Laser Scanner Data. – *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **34** (3/W4): 219–226.
- HILDEBRANDT, G., 1996: Fernerkundung und Luftbildmessung für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie. – Wichmann, Heidelberg.
- HOLLAUS, M., WAGNER, W., MAIER, B. & SCHADAUER, K., 2007: Airborne Laser Scanning of Forest Stem Volume in a Mountainous Environment. – *Sensors* **7**: 1559–1577.
- HUSS, J., 1984: Luftbildmessung und Fernerkundung in der Forstwirtschaft. – Wichmann, Karlsruhe.
- HYYPÄ, J., YU, X., HYYPÄ, H. & MALTAMO, M., 2006: Methods of Airborne Laser Scanning for forest information extraction. – International workshop “3D Remote Sensing in Forestry”, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna, Austria: 63–78.
- KOCH, B., HEYDER, U. & WEINACKER, H., 2006: Detection of Individual Tree Crowns in Airborne Lidar Data. – *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **72** (4): 357–363.
- KORN-ALLAN, E., V.D. GOLTZ, H., BLUST, M. & NOTH-DURFT, A., 2004: Verfahrenshandbuch Betriebsinventur. – Version 1.1., Landesforstverwaltung Baden-Württemberg.
- KRAMER, H. & AKÇA, A., 1995: Leitfaden zur Waldmesslehre. – J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main.
- KRAUS, K., 2004: Photogrammetrie – Band 1. – De Gruyter, Berlin.
- MALLET, C. & BRETAR, F., 2009: Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. – *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **64** (1): 1–16.
- MEANS, J.E., ACKER, S.A., FITT, B.J., RENSLOW, M., EMERSON, L. & HENDRIX, C.J., 2000: Predicting Forest Stand Characteristics with Airborne Laser Scanning LIDAR. – *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **66** (11): 1367–1371.
- METTE, T., 2007: Forest Biomass Estimation from Polarimetric SAR Interferometry. – Doctoral Thesis, München.
- MLR, 1993: Hilfstabellen für die Forsteinrichtung. – Ministerium für Ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Baden Württemberg, Stuttgart.
- NÆSSET, E., 2002: Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. – *Remote Sensing of Environment* **80** (1): 88–99.
- PACKALÉN, P. & MALTAMO, M., 2006: Predicting the plot volume by tree species using airborne laser scanning and aerial photographs. – *Forest Science* **52** (6): 611–622.
- PRETZSCH, H., 2001: Modellierung des Waldwachstums. – Parey, Berlin.
- RAUTIAINEN, M., 2005: The spectral signature of coniferous forests: the role of stand structure and leaf area index. – *Doctoral Thesis, Helsinki, Finland*.
- REITBERGER, J., KRZYSZEK, P. & STILLA, U., 2008: 3D segmentation and classification of single trees with full waveform LiDAR data. – *SilviLaser 2008 conference*, Edinburgh, UK: 216–225.
- RIEGER, W., ECKMÜLLNER, O., MÜLLNER, H. & REITER, T., 1999: Laser-Scanning for the derivation of forest stand parameters. – *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **32** (3/W14): 193–201.
- SITHOLE, G., 2005: Segmentation and Classification of Airborne Laser Scanner Data. – *Publications on Geodesy*, **59**, Delft, The Netherlands.
- STRAUB, C., DEES, M., WEINACKER, H. & KOCH, B., 2008A: Combining Airborne Laser Scanning and GIS Data to estimate Timber Volume of Forest Stands based on Yield Models. – *SilviLaser 2008 conference*, Edinburgh, UK: 572–580.
- STRAUB, C., WEINACKER, H. & KOCH, B., 2008B: A Fully Automated Procedure for Delineation and Classification of Forest and Non Forest Vegetation based on Full Waveform Laserscanner Data. – *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **37** (B8): 1013–1019.
- WEINACKER, H., KOCH, B., HEYDER, U. & WEINACKER, R., 2004: Development of filtering, segmentation and modelling modules for LIDAR and multispectral data as a fundamental of an auto-

matic forest inventory system. – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **36** (8/W2): 90–95.

Address of the Authors:

Christoph Straub, Matthias Dees, Holger Weinacker, and Barbara Koch, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Abteilung Fernerkundung und Landschaftsinformationssysteme (FeLIS), Tennenbacherstr. 4, D-79106 Freiburg, Tel.: +49-761-203-3700, Fax: +49-761-203-3701, email: christoph.straub@felis.uni-freiburg.de

Manuskript eingereicht: Dezember 2008  
Angenommen: Februar 2009



## Berichte von Veranstaltungen

### 8. Oldenburger 3D-Tage vom 28.–29. Januar 2009

Die achten Oldenburger 3D-Tage mit dem Titel „Optische 3D-Messtechnik – Photogrammetrie – Laserscanning“ fanden in diesem Jahr vom 28. bis 29. Januar an der Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven (FH OOW) statt. Die Veranstaltung wurde von Prof. Dr. THOMAS LUHMANN vom Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik (IAPG) der FH OOW und Prof. Dr. HEINZ-JÜRGEN PRZYBILLA vom Arbeitskreis Nahbereichsphotogrammetrie der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) organisiert. Unterstützt wurden die Organisatoren vom Institut für Mess- und Auswertetechnik (IMA) und dem Institut für Innovations-Transfer Emden (ITI), beide FH OOW. Die Tagung wurde wie in den Jahren zuvor von einer interessanten Fachaussstellung mit 22 Ausstellern begleitet.



Demonstration eines UAV-Systems vor den Veranstaltern Prof. T. LUHMANN (rechts) und Prof. M. WEISENSEE (Mitte) während der Ausstellung. Foto: Piet Meyer, IAPG Oldenburg

Insgesamt nahmen 212 Teilnehmer aus Deutschland, der Schweiz, Kanada, Österreich, den Niederlanden und Belgien an der Tagung teil. Die Teilnehmer waren etwa zur Hälfte Hochschulangehörige und zur anderen Hälfte Anwender, Dienstleister sowie Hersteller. Diese ausgewogene Mischung unterstreicht die herausragende Stellung der Konferenz für Experten aus Industrie und Wissenschaft aus den Themengebieten der optischen

3D-Messtechnik, der Photogrammetrie und des terrestrischen Laserscannings (TLS).

Nach der Eröffnung durch Prof. Dr. LUHMANN sprach Prof. Dr. MANFRED WEISENSEE, Vizepräsident der FH OOW, die Grußworte und würdigte das Engagement der Organisatoren insbesondere für die Schaffung der Möglichkeit des Informationsaustauschs zwischen Industrie und Wissenschaft. Des Weiteren betonte er, dass die Oldenburger 3D-Tage einen großen Beitrag dazu geleistet haben, dass Oldenburg in diesem Jahr Stadt der Wissenschaft ist. Mit dem anschließenden Plenarvortrag zum Thema *Dynamische Szenenanalyse* eröffnete Dr. CHRISTIAN WÖHLER von der Daimler AG den fachlichen Teil der Tagung. Dabei stellte er die wichtige Stellung der optischen 3D-Messtechnik für Innovationen im Bereich der Fahrerassistenzsysteme in der Automobilindustrie heraus.

Die weitere Konferenz war in 14 Themenblöcke unterteilt, wovon jeweils zwei parallel durchgeführt wurden. Insgesamt gab es mehr als fünfzig Fachvorträge zu den diesjährigen Themenschwerpunkten *Hybride Sensorsysteme*, *Navigation von Objekten und Sensoren*, *Dynamische Prozesse*, *Genauigkeitsprüfungen von Laserscannern*, sowie den regelmäßig behandelten Themen *Neue Sensoren und Messsysteme*, *3D-Erfassung von Freiformflächen*, *3D-Bildverarbeitung* und *Anwendungen*.

Die ersten beiden Vortragsblöcke des Schwerpunktes Optische 3D-Messtechnik und Photogrammetrie standen unter dem Thema *Dynamische Prozesse*. In den ersten beiden Vorträgen wurden Konzepte zur multisensoralen Datenfusion für Fahrerassistenzsysteme und zur Bewertung der Umfeldbeschreibung eines Sensors anhand verschiedener Kriterien beschrieben. Im dritten Beitrag wurden die Grundlagen für den Einsatz eines Photomischdetektors (PMD)-Sensors zur Oberflächenvermessung im Tagebau präsentiert. Den Abschluss des ersten Blocks bildete ein Vortrag zur präzisen Erfassung von dynamischen Vorgängen in der Fertigungsmesstechnik.

Im zweiten Vortragsblock zum Thema *Dynamische Prozesse* wurden zunächst Verfahren vorgestellt, mit denen zum einen anhand einer Sequenz eine 3D-Szene rekonstruiert und zum anderen über die Auswertung von Stereosequenzen die Objektbewegung erfasst und präzisiert werden kann. Die hochfrequente Erfassung von Pressenbewegungen während des Massivumformprozesses mit Highspeed-Kameras war Inhalt des dritten Vortrags. Im letzten Beitrag dieses Themenblocks wurde die Image Pattern Correlation Technique (IPCT) vorgestellt, mit der aus zwei Highspeed-Videosequenzen die Oberfläche und somit auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Airbags bestimmt werden kann.

Im Vortragsblock *Sensoren und Systeme* stand in den ersten beiden Vorträgen das Thema elektromagnetische 3D-Positionsmessung in der Medizin im Mittelpunkt. Dabei wurden sowohl die praxisgerechte Anwendung wie auch die erzielbare Längenmessabweichung betrachtet und bewertet. In den zwei folgenden Vorträgen wurden Verfahren zur präzisen Oberflächenvermessung vorgestellt. Zunächst wurde der Einsatz eines hoch auflösenden Inline-Messsystems auf Basis des Zeilenkameranchnitts (3D-Inliner) zur Oberflächenvermessung von Fahrzeugbauteilen präsentiert. Im Anschluss wurde die Rauheitsmessung mittels des Autofokusprinzips bei der Vermessung von Werkzeugstahloberflächen erläutert.

Im Vortragsblock zum Thema *6-DOF* (Degrees of Freedom) wurden Systeme präsentiert, die aus einem Lasertracker in Kombination mit photogrammetrischen Auswerteverfahren bestehen und die präzise Position und Orientierung eines Messtasters automatisiert bestimmen können. Des Weiteren wurden Verfahren zur automatischen Positionsmessung von menschlichen Körperteilen anhand von vereinfachten 3D-Körpermodellen des Menschen aufgezeigt.

In dem Vortragsblock zum Thema *UAVs – Unmanned Aerial Vehicles* wurde im ersten Vortrag ein kurzer Überblick über die Geschichte der UAVs gegeben und auf die rechtlichen Grundlagen zum Betrieb der Systeme eingegangen. In den weiteren Vorträgen wurden drei Systeme und deren Einsatzmöglichkeiten anhand anschaulicher Beispiele vorgestellt.

Im dritten Vortragsblock zum Thema *Dynamische Prozesse* wurden kombinierte Verfahren zur dynamischen Positionsbestimmung präsentiert, wobei der Fokus auf die Qualität der Daten und die Effizienz der Erfassung gelegt wurde. Im ersten Vortrag wurde ein Messsystem zur kinematischen Objekterfassung präsentiert, das aus der Kombination eines GPS-Empfängers, eines Laserscanners und Inertialmesstechnik besteht. Im zweiten Vortrag wurde ein ähnliches System zur Erfassung von beispielsweise 3D-Stadtmodellen vorgestellt, welches einen GPS-Empfänger, einen Laserscanner und ein Stereomesssystem zur photogrammetrischen Auswertung beinhaltet. Des Weiteren wurde in diesem Vortragsblock der Einsatz eines Messsystems bestehend aus einem motorisierten Theodoliten und einer Digitalkamera für technische Präzisionsmessungen und kinematisches Tracking präsentiert. Im abschließenden Vortrag wurde ein kombiniertes Messsystem zur dynamischen Bestimmung von Baumpositionen und -durchmessern für die Waldinventur vorgestellt.

Das Thema des letzten Vortragsblocks lautete *Photogrammetrie*. Im ersten Vortrag wurde eine geschlossene Lösung für den räumlichen Rückwärtsschnitt mit minimalen Objektinformationen als Alternative zu existierenden Verfahren vorgestellt. Ergebnisse der Untersuchungen zur Bestimmung des Bildhauptpunkts durch Simultankalibrierung wurden im zweiten Beitrag präsentiert. Dabei wurde speziell auf die Frage nach der Notwendigkeit von gewälzten Aufnahmen und den Auswirkungen der Auswertung ohne gewälzte Aufnahmen eingegangen. In einem weiteren Beitrag wurde der Einsatz der Photogrammetrie als Ergänzung zu chemischen und physikalischen Methoden zur Bestimmung der Herkunft von Marmor beschrieben. Im vierten Beitrag wurde die Anwendung der Photogrammetrie zur Rissanalyse in verschiedenen Materialien im bautechnischen Versuchswesen vorgestellt.

In den Parallelsessions des zweiten Schwerpunktes Laserscanning wurden Fragen zur Prüfung und Kalibrierung von TLS erörtert, neue Forschungsansätze zur Auswertung von TLS-Messungen vorgestellt, sowie Beispiele des sich ständig erweiternden Anwendungs-



feldes von Laserscannern präsentiert. Traditionell erhielten die Aussteller der Fachausstellung in zwei Vortragsblöcken die Möglichkeit, ihre neusten Produktentwicklungen dem Publikum vorzustellen.

Im Vortragsblock *Laserscanning – Prüfung und Genauigkeitsanalyse*, den ausschließlich Hochschulvertreter als Vortragende bestritten, wurden in zwei Vorträgen die Einrichtung von TLS-Prüffeldern sowie Analyseergebnisse ausgewählter Scanner vorgestellt. Ebenso wurden Untersuchungsergebnisse des Distanzmessteils eines Scanners sowie statistische Ansätze zur Genauigkeitsbeschreibung von TLS-Ergebnissen präsentiert. Ein Ansatz für ein herstellerunabhängiges binäres Austauschformat von TLS-Daten lässt hoffen, dass zukünftig der Datenaustausch effizienter gestaltet werden kann.

Die Einbindung des TLS in die Prozesskette zur Optimierung von Wasserkraftwerken bildete den Auftakt zum Vortragsblock *Anwendungen I*, in dem die Variabilität der Anwendungsgebiete des TLS offenkundig wurde. Deformationsmessungen mit TLS für geotektonische Aufgabenstellungen sowie zur Bestimmung der Schiefstellung von Bauwerken schlossen sich an. Des Weiteren wurde der Einsatz von TLS für die 3D-Rekonstruktion historischer Exponate vorgestellt.

In den beiden *Herstellerforen* präsentierten die Aussteller neueste Entwicklungen der Hard- und Software für die 3D-Objekterfassung und Objektrekonstruktion. Dabei wurden Innovationen im TLS, der industriellen Messtechnik sowie Makroscanner, die vornehmlich für Messaufgaben im Nahbereich eingesetzt werden, vorgestellt.

Das offene Forum *Prüfung und Kalibrierung von Terrestrischen Laserscannern* wurde mit einem Initialvortrag zu einem Vorschlag für eine TLS-Prüfrichtlinie begonnen, dem sich eine angeregte Diskussion zu diesem Thema anschloss. Insbesondere wurde herausgestellt, dass einheitliche Instrumentenkenngrößen die Beurteilung von Scannern erleichtern würde und eine Prüfrichtlinie lediglich dem Anwender die Möglichkeit bieten soll, die Leistungsparameter bzw. ihre Veränderungen vor Ort überprüfen zu können. Aufgrund der Komplexität der Systeme soll die Kalibrierung weiterhin den Herstellern bzw.

spezialisierten Institutionen vorbehalten bleiben. Es war allgemeiner Konsens, dass die Richtlinie in einen internationalen Kontext eingebunden werden muss, um die Akzeptanz der Hersteller zu erhöhen.



Der Vortragende Dr. C. HESSE vor dem Auditorium. Foto: Piet Meyer, IAPG Oldenburg

Unter der Überschrift *Algorithmen und Auswertungen* wurden Vorträge insbesondere zur Registrierung von Laserscannerdaten sowie zur Kalibrierung von Sensorsystemen für das kinematische Laserscanning gehalten. Mit der Bestimmung von Transformationsparametern auf der Grundlage von 3D-Geraden und projektiver Geometrie sowie einer linearisierten Näherungslösung der Iterative Closest Point (ICP)-Fehlerfunktion wurden neue Entwicklungen zur Registrierung von TLS-Daten vorgestellt. Am Beispiel der objektbasierten Koregistrierung von Laserscannerdaten bei der luftgestützten Erfassung urbaner Gebiete wurde ein Verfahren zur einheitlichen Georeferenzierung für airborne Laserscanningdaten aufgezeigt. Dass auch das aus der airborne 3D-Datenerfassung bekannte Verfahren des Boresight-Alignments für kinematisches TLS eingesetzt werden kann, wurde abschließend anhand von Beispielen demonstriert.

Der zweite Vortragsblock zum Thema *Anwendungen* griff nochmals die Deformationsbestimmung am Beispiel von Tunnellaubungen auf. Die Sensorfusion mit Global Navigation Satellite System (GNSS) für Maschinensteuerungen wurde am Beispiel von Systemen für Absetzer in Braunkohletagebauen demonstriert. Die Lagebestimmung von Glasfasern im Beton mittels TLS sowie tachymetrisches Scanning bei Deformationsmessungen an historischen Gebäuden bildeten den Abschluss des Vortragsblockes.

Wie in den Jahren zuvor war auch das gemeinsame traditionelle Grünkohlessen in der

Weser-Ems-Halle eine gute Gelegenheit, um die fachlichen Diskussionen weiterzuführen und mit Experten ins Gespräch zu kommen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Oldenburger 3D-Tage auch in diesem Jahr wieder eine gelungene Kombination aus Wissenschaft und Anwendung darstellten. Die Oldenburger 3D-Tage haben sich zu einem festen Termin für Experten aus dem Themenbereich der optischen 3D-Messtechnik in Industrie und Wissenschaft etabliert, wie die Zusammensetzung der Teilnehmer belegt. Es bleibt zu hoffen, dass diese Tradition auch zukünftig

fortgesetzt werden kann. Für das nächste Jahr haben die Planungen für die Oldenburger 3D-Tage, die an zwei Tagen in der ersten Februarwoche 2010 stattfinden sollen, allerdings bereits begonnen. Wie auch in den letzten Jahren wird ein Tagungsband zur Veranstaltung voraussichtlich im April 2009 im Wichmann Verlag erscheinen, in dem die (abgegebenen) Beiträge aller Vortragenden zusammengefasst sind.

KARSTEN RAGUSE, Braunschweig  
HEINZ RUNNE, Dessau

## Veranstaltungskalender

### 2009

15.–19. Juni: GSDI 11 World Conference **"Spatial Data Infrastructure Convergence: Building SDI Bridges to Address Global Challenges"** in **Rotterdam**, Niederlande. [gsdi.org/gsd11/](http://gsdi.org/gsd11/)

16. Juni: 3. **Hamburger Anwenderforum Terrestrisches Laserscanning** an der Hafen-City Universität **Hamburg**. [www.hcu-hamburg.de/geomatik/tls2009/](http://www.hcu-hamburg.de/geomatik/tls2009/)

17.–19. Juni: **Workshop** der ISPRS WG VI/1+2 **on E-Learning Tools, Techniques and Applications** in **Potsdam**. [www.igg.tu-berlin.de/ISPRS/workshop09](http://www.igg.tu-berlin.de/ISPRS/workshop09)

24.–26. Juni: 27<sup>th</sup> **Urban Data Management Symposium** in **Ljubljana**, Slowenien. [www.udms.net](http://www.udms.net)

1.–2. Juli: 9<sup>th</sup> **Conference on Optical 3-D Measurement Techniques** in **Wien**, Österreich. [info.tuwien.ac.at/ingeo/optical3d/](http://info.tuwien.ac.at/ingeo/optical3d/)

7.–10. Juli: **Geoinformatics Forum Salzburg**, Österreich (GI\_Forum2009). [www.gi-forum.org/](http://www.gi-forum.org/)

21.–24. Juli: 6<sup>th</sup> **International Symposium on Mobile Mapping Technology – MMT'09** in **Presidente Prudente**, Brasil. [www.fct.unesp.br/eventos/simposio/mmt09/ingles/](http://www.fct.unesp.br/eventos/simposio/mmt09/ingles/)

2.–6. August: **SPIE Conference Videometrics X** in **San Diego**, USA. Info: Dr. Fabio Remondino, [fabio@geod.baug.ethz.ch](mailto:fabio@geod.baug.ethz.ch)

6.–7. August: 3<sup>rd</sup> **ICA Workshop on Geospatial Analysis & Modeling** in **Gävle**, Schweden. [www.hig.se/~bjg/ica/workshop2009/](http://www.hig.se/~bjg/ica/workshop2009/)

12.–14. August: 17<sup>th</sup> **International Conference of Geoinformatics** in **Fairfax**, Virginia, USA. [www.geoinformatics2009.org/](http://www.geoinformatics2009.org/)

24.–28. August: 1<sup>st</sup> **International Conference on 3D Maps – ICA Symposium on True-3D in Cartography** in **Dresden**. [Kartographie.geo.tu-dresden.de/true3Dincartography09/](http://Kartographie.geo.tu-dresden.de/true3Dincartography09/)

1.–2. September: **ISPRS Laser Scanning Workshop 2009** in **Paris**, Frankreich. [laser-scanning2009.ign.fr](http://laser-scanning2009.ign.fr)

3.–4. September: **CMRT09 – ISPRS Workshop on Object Extraction for 3D City Models, Road Databases and Traffic Monitoring - Concepts, Algorithms and Evaluation** in **Paris**, Frankreich. [cmrt09.ign.fr](http://cmrt09.ign.fr)

7.–11. September: 52. **Photogrammetrische Woche 2009** in **Stuttgart**. [www.ifp.uni-stuttgart.de/phowo/](http://www.ifp.uni-stuttgart.de/phowo/)

29. September – 2. Oktober: **ICCV2009 – International Conference on Computer Vision** in **Kyoto**, Japan. [www.iccv2009.org](http://www.iccv2009.org)

11.–15. Oktober: 22<sup>nd</sup> **CIPA Symposium** in **Kyoto**, Japan. [www.rgis.lt.ritsumei.ac.jp/cipa2009/](http://www.rgis.lt.ritsumei.ac.jp/cipa2009/)

21.–22. Oktober: **n-DGIS 2009 – ISPRS International Workshop on Multidimensional and Mobile Data Model 2009** in **Johor Bahru**, Malaysia. [www.fksg.utm.my/isprswgII5/](http://www.fksg.utm.my/isprswgII5/)

## Zum Titelbild

### Historische Messbildkamera von Albrecht Meydenbauer



Das Titelbild<sup>1</sup> zeigt eine der beiden letzten erhaltenen historischen Messbildkameras, die vom Pionier der Photogrammetrie, Albrecht Meydenbauer, konzipiert wurden und sich heute in der Schweizerischen Nationalbibliothek in Bern befinden. Die Arbeiten von Albrecht Meydenbauer gaben den Impuls zur Gründung der Königlich-Preussischen Messbildanstalt im Jahre 1885 in Berlin. Das hieraus entstandene Denkmäler-Archiv gilt auch heute noch als das größte photogrammetrische Archiv und beinhaltet hauptsächlich Aufnahmen historischer Gebäude und Kulturdenkmäler aus dem 19. und 20. Jahrhundert. Diese entstanden nicht nur in den Bundesstaaten des Kaiserreiches, sondern auch auf ausgedehnten Reisen, die Meydenbauer und seine Nachfolger zum Beispiel nach Griechenland, in die Türkei und in den Libanon führten. Die Photographien dienen heute in vielen Fällen Archäologen und Kunsthistorikern als unverzichtbare Grundlage für die Rekonstruktion verlorener Baudenkmäler und Kunstwerke.

Begleitend zu der interdisziplinären Konferenz „Historic Maps and Imagery for Modern Scientific Applications“ vom 28. – 30. November 2008 in Bern (siehe Editorial und sieben Beiträge in dieser Ausgabe der PFG) wurden die beiden Meydenbauer-Kameras in der Schweizerischen Nationalbibliothek präsentiert. Zudem zeigte die Antikensammlung der Universität Bern in Zusammenarbeit mit dem Brandenburgischen Landesamt für Denkmalpflege und dem Archäologischen Landesmuseum Brandenburg eine Ausstellung von mehr als achtzig Aufnahmen, welche im Rahmen einer knapp hunderttägigen Griechenlandreise entstanden, die der damalige Vorstand der Königlich-Preussischen Messbildanstalt, Theodor von Lüpke, leitete. Diese Bilder wurden erstmals im Jahre 1911 anlässlich der X. Internationalen Kunstausstellung in Rom vorgestellt und sie wurden auch in Bern – wie bereits in der ursprünglichen Ausstellung vor fast 100 Jahren – begleitend zur Veranstaltung im direkten Kontext von Gipsabgüssen zeitgleicher griechischer Meisterwerke präsentiert.

Dr. (USA) DIRK RIEKE-ZAPP, Institut für Geologie, Baltzerstrasse 1+3, CH-3012 Bern, e-mail: [zapp@geo.unibe.ch](mailto:zapp@geo.unibe.ch)

RALPH ROSENBAUER, SUSANNE RUTHISHAUSER, Institut für Archäologie, Länggass-Straße 10, CH-3012 Bern, e-mail: [ralph.rosenbauer@arch.unibe.ch](mailto:ralph.rosenbauer@arch.unibe.ch), [susanne.rutishauser@arch.unibe.ch](mailto:susanne.rutishauser@arch.unibe.ch)

DI Dr. ALEXANDER REITERER, Institut für Geodäsie und Geophysik, Gusshausstraße 27-29 / E128-3, A-1040 Wien, e-mail: [alexander.reiterer@tuwien.ac.at](mailto:alexander.reiterer@tuwien.ac.at)

<sup>1</sup> Foto: Simon Schmid, Schweizerische Nationalbibliothek

## Korporative Mitglieder

### Firmen

AEROWEST GmbH  
 AICON 3D Systems GmbH  
 aphos Leipzig AG  
 Applanix Corporation  
 Becker GeoInfo GmbH  
 Bernhard Harzer Verlag GmbH  
 Blom Deutschland GmbH  
 Brockmann Consult  
 BSF Luftbild GmbH  
 Büro Immekus  
 CGI Systems GmbH  
 con terra GmbH  
 Creaso GmbH  
 DEFINIENS AG  
 DELPHI IMM GmbH  
 Deutsches Bergbau-Museum  
 J. Linsinger ZT-GmbH  
 EFTAS Fernerkundung Technologietransfer GmbH  
 ESG Elektroniksystem- und Logistik-GmbH  
 ESRI Geoinformatik GmbH  
 EUROPEAN SPACE IMAGING  
 Eurosense GmbH  
 fokus GmbH  
 fpi Fuchs Ingenieure GmbH  
 g.on experience gmbh  
 GAF GmbH  
 GeoCad GmbH  
 GeoCart Herten GmbH  
 GeoContent GmbH  
 geoplana Ingenieurgesellschaft mbH  
 GEOSPACE Beckel GmbH  
 GEOSYSTEMS GmbH  
 GGS - Büro für Geotechnik, Geoinformatik, Service  
 GIP Geoinformatics & Photogrammetric Engineering  
 Hansa Luftbild AG  
 Herbert Wichmann Verlag Hüthig GmbH  
 IGI - Ingenieur-Gesellschaft für Interfaces mbH  
 ILV Ing.-büro für Luftbildausw. und Vermessung  
 Imetric 3D GmbH  
 Dr. H. Carls Luftbilddatenbank  
 Inpho GmbH  
 Intergraph GmbH, Geschäftsbereich Z/I Imaging  
 INVERS - Industrievermessung & Systeme  
 Jena-Optronik GmbH  
 Johan Piedfort Photogrammetrie  
 KAZ Bildmess GmbH  
 Leica Geosystems GmbH  
 Luftbild Brandenburg GmbH  
 MAPS geosystems GmbH  
 Messbildstelle GmbH  
 Microsoft Photogrammetry  
 PHOENICS GmbH  
 PMS - Photo Mess Systeme AG  
 Rollei Metric GmbH  
 RWE Power AG, Geobasisdaten/Photogrammetrie  
 technet GmbH  
 TERRA-Bildmessflug GmbH & Co.  
 TerraVista Umweltdaten GmbH  
 TopoSys GmbH  
 TRIGIS Vermessung + Geoinformatik GmbH  
 trimetric 3D Service GmbH, Garbsen

### Behörden

Amt für Geoinformationswesen der Bundeswehr  
 Amt für ländliche Räume Husum  
 Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft  
 Bundesamt für Kartographie und Geodäsie  
 Bundesmin. für Ern., Landw. und Verbraucherschutz  
 DB Netz AG  
 Hess. LA für Bodenmanagement und Geoinformation  
 Innenministerium NRW, Gruppe Vermessungswesen  
 Inst. für Umwelt- und Zukunftsforschung  
 LA für Vermessung und Geoinformation, Bayern  
 Landesbetrieb Geoinformation und Verm., Hamburg  
 Landesvermessung und Geobasisinformation  
 Nieders.  
 Landesvermessungsamt Baden-Württemberg  
 Märkischer Kreis, Vermessungs- und Katasteramt  
 Regierungsprä. Stuttgart, LA für Flurneuordnung  
 Regierungsprä. Tübingen, Abt. 8 Forstdirektion  
 Regionalverband Ruhr  
 Staatsbetrieb Sachsenforst Pirna  
 Stadt Bocholt, Fachbereich 31  
 Stadt Düsseldorf, Vermessungs- und Katasteramt  
 Stadt Köln, Amt für Liegensch., Verm. und Kataster  
 Stadt Wuppertal, Verm., Katasteramt und Geodaten  
 Thüringer LA für Vermessung und Geoinformation

### Hochschulen

BTU Cottbus, Lehrstuhl für Vermessungskunde  
 HS Bochum, FB Vermessung. und Geoinformatik  
 FH Frankfurt a.M., FB 1, Studiengang Geoinformation  
 FH Karlsruhe, FB Geoinformationswesen  
 FH Mainz, Inst. f. Raumbez. Inform.- und Messtechn.  
 FH Oldenburg, Inst. f. Angew. Photogr. und Geoinfo.  
 HCU HafenCity Uni Hamburg, Department  
 Geomatik  
 HfT Stuttgart, Vermessung und Geoinformatik  
 HTW Dresden, FB Vermessungswesen/Kartographie  
 Ruhr-Uni Bochum, Geographisches Institut  
 RWTH Aachen, Geodätisches Institut  
 TU Berlin, Computer Vision & Remote Sensing  
 TU Braunschweig, Inst. für Geodäsie und Photogr.  
 TU Clausthal, Inst. für Geotechnik und Markscheidew.  
 TU Darmstadt, Inst. für Photogrammetrie und  
 Kartogr.  
 TU Dresden, Inst. für Photogrammetrie und Fernerk.  
 TU Freiberg, Inst. für Geologie, RSG  
 TU München, FG Photogrammetrie und Fernerk.  
 TU Wien, Inst. für Photogrammetrie und Fernerk.  
 Uni Bonn, Inst. für Photogrammetrie  
 Uni Göttingen, Inst. für Waldinv. und Waldwachstum  
 Uni Hannover, Inst. für Kartogr. und Geoinformatik  
 Uni Hannover, Inst. für Photogrammetrie und  
 GeoInf.  
 Uni Heidelberg, IWR Interdis. Zentr. f. Wiss.  
 Rechnen  
 Uni Karlsruhe, Inst. für Photogrammetrie und Fernerk.  
 Uni Kassel, FB Ökologische Agrarwissenschaften  
 Uni Kiel, Geographisches Institut  
 Uni zu Köln, Geographisches Institut  
 Uni Stuttgart, Inst. für Photogrammetrie  
 Uni Würzburg, Geographisches Institut



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

## **Assistenzprofessur (Tenure Track) für Photogrammetrie**

Die Professur entwickelt in der Forschung neue Methoden zur photogrammetrischen Bildanalyse mit einem Schwerpunkt auf quantitativ-geometrische Aspekte für aktuelle und neue Anwendungsbereiche. Im Vordergrund stehen dabei die hochpräzise geometrische und stochastische Sensormodellierung, das Design von Mess-Systemen und Komponenten sowie halbautomatische und automatische Objektextraktionsverfahren und real-time-Prozessierung. Die Professur ist verantwortlich für die fachbezogenen Lehrveranstaltungen auf BSc-, MSc- und PhD-Stufe. Die Unterrichtssprache auf Masterstufe ist Englisch.

Vorausgesetzt werden eine universitäre Ausbildung mit Doktorat in Geomatik/Geodäsie oder in einer verwandten Disziplin wie Informations- oder Elektroingenieurwissenschaften sowie ein Post-Doktorat und/oder Erfahrung in der Industrie oder in Institutionen auf dem Gebiet der Photogrammetrie. Kandidatinnen und Kandidaten verfügen über einen hervorragenden wissenschaftlichen Leistungsausweis und ein innovatives, interdisziplinäres Forschungsprogramm. Ein nationales und internationales Netzwerk ist entscheidend für eine erfolgreiche Zusammenarbeit mit Industriepartnern und anderen Organisationen.

Assistenzprofessuren dienen der Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Sie werden auf vier Jahre besetzt; eine Verlängerung um weitere zwei Jahre sowie eine Beförderung auf eine ausserordentliche Professur sind möglich.

Bewerbungen mit Lebenslauf, Publikationsliste, einem Verzeichnis der bearbeiteten Projekte sowie einem Konzept für die zukünftige Lehre und Forschung sind **bis zum 31. Juli 2009 einzureichen beim Präsidenten der ETH Zürich, Prof. Dr. Ralph Eichler, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz**. Im Bestreben, den Frauenanteil in Lehre und Forschung zu erhöhen, fordert die ETH Zürich Wissenschaftlerinnen ausdrücklich zur Bewerbung auf.







# PFG

# Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation

**Jahrgang 2009  
Heft 3**

Organ der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie,  
Fernerkundung und  
Geoinformation (DGPF) e.V.  
Indexed in Science Citation  
Index Expanded (SciSearch®)  
Journal Citation Reports/  
Science Edition



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